



**Cláudio Gabriel  
Pereira Neves**

**Processos de maquinagem CAD/CAM em produção  
de pequenas séries – Casos de Estudo**



**Cláudio Gabriel  
Pereira Neves**

**Processos de maquinagem CAD/CAM em produção  
de pequenas séries – Casos de Estudo**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor António Manuel Godinho Completo, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Apoio financeiro dos projetos  
UID/EMS/00481/2013-FCT e CENTRO-  
01-0145-FEDER-022083

## **o júri**

Presidente

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva  
Professor associado c/agregação, Universidade de Aveiro

Vogal – Arguente Principal

Doutora Ana Sofia dos Santos Conceição  
Técnica Especialista, Renault Cacia, SA

Vogal - Orientador

Professor Doutor António Manuel Godinho Completo  
Professor auxiliar c/agregação, Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Ao meu orientador, Prof. António Manuel Godinho Completo, pela sua disponibilidade, conselhos e orientação que valorizaram este relatório de estágio,

À empresa Fernando Ferro & Irmão e a todos os seus colaboradores, pelo acolhimento e disponibilidade demonstrados,

À minha namorada pelo apoio, compreensão e paciência,

À minha mãe que me suportou ao longo destes meses e me incentivou,

Ao meu pai pelo apoio sempre presente,

À minha família pelo carinho e amor demonstrados,

E por último, a Deus que me ajudou e deu forças necessárias para realizar e terminar este trabalho.



## **palavras-chave**

CNC, Metrologia, Maquinagem Rápida, Maquinagem, Ferramentas de Corte

## **resumo**

Num mundo onde cada vez mais o tempo e qualidade são pontos fundamentais para a indústria, a tecnologia CNC destaca-se pela rapidez, precisão, qualidade e versatilidade que oferece na maquinagem de peças de precisão. O presente Relatório de Estágio versou uma análise detalhada dos processos de maquinagem associados à tecnologia CNC e afins desenvolvidos na empresa Fernando Ferro & Irmão, S.A., sediada em Estarreja. Esta empresa dedica-se exclusivamente à produção de pequenas e médias séries de peças maquinadas recorrendo a equipamentos de maquinação dotados de tecnologia CNC e com preparação baseada em ferramentas de CAD/CAM. Na fase inicial deste trabalho procedeu-se ao estudo da empresa nas vertentes da sua organização, dos equipamentos instalados, dos procedimentos de trabalho internos, assim como, do estudo dos processos de preparação dos trabalhos de maquinação para os diferentes tipos de componentes com base nas ferramentas de CAD/ CAM utilizados pela empresa. Posteriormente, desenvolveu-se uma análise à evolução da tecnologia CNC ao longo dos últimos anos, assim como, de todos os elementos de interface com esta tecnologia, tais como, as ferramentas de corte, os sistemas de fixação e os controladores. Procurou-se também fazer uma análise descritiva dos sistemas de CAD/CAM e sua importância fundamental para a aplicação e performance da tecnologia de maquinagem CNC. Realizou-se uma descrição das principais tarefas envolvidas no planeamento e preparação de maquinagem de uma peça, desde a fase de preparação da produção, passando pela conversão das cotas de definição em cotas de fabrico através da ferramenta cadeia de cotas e estabelecimento da sequência de maquinagem. Após estas etapas, desenvolveram-se trabalhos de preparação, controlo dimensional e maquinagem CNC de diferentes casos de estudo propostos pela empresa durante o período do estágio. Para cada caso de estudo é apresentado o seu enquadramento, a metodologia aplicada e os resultados obtidos, assim como, propostas de melhoria ou recomendações como forma de otimizar o processo produtivo e incrementar a qualidade do produto final.

**keywords**

CNC, Metrology, Fast Machining, Machining, Cutting Tools

**abstract**

In a world where time and quality are increasingly important to the industry, CNC technology stands out for the speed, precision, quality and versatility that it offers in the machining of precision parts. This Stage Report included a detailed analysis of the machining processes associated with CNC technology and related issues developed at the company Fernando Ferro & Irmão, S.A., headquarters in Estarreja. This company is exclusively dedicated in the production of small and medium series of machined parts, using machining equipment equipped with CNC technology and with preparation based on CAD / CAM tools. In the initial phase of this work the company was studied in the aspects of its organization, the equipment installed, the internal work procedures, as well as, the study of the procedures of preparation of the machining works for the different types of components based on the CAD / CAM tools used by the company. Subsequently, an analysis was made of the evolution of CNC technology over the last years, as well as, of all interface elements with this technology, such as cutting tools, fastening systems and controllers. We also sought to make a descriptive analysis of CAD / CAM systems and their fundamental importance for the application and performance of CNC machining technology. A description of the main tasks involved in the planning and preparation of one-part machining, from the preparation phase of production, through the conversion of the definition quotas to the manufacturing quotas through the chain tool and the establishment of the machining sequence. After these steps, work was done on preparation, dimensional control and CNC machining of different case studies proposed by the company during the internship period. The outline for each case study is presented, the methodology applied, the results obtained, as well as, the proposals for improvement or recommendations to optimize the production procedure and increase the quality of the final product.

## Índice

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento .....	1
1.2.	Motivação .....	1
1.3.	Objetivos .....	1
1.4.	Organização do Documento .....	2
2.	A empresa Fernando Ferro & Irmão .....	3
2.1.	Apresentação .....	3
2.2.	Equipamentos e Tecnologia .....	4
2.3.	Layout da empresa .....	6
2.4.	Organização do trabalho .....	7
2.5.	Gestão da produção .....	8
2.6.	Gestão de Ferramentas .....	10
2.7.	Controlo Dimensional e Geométrico .....	11
3.	Estudo da evolução da tecnologia CNC e perspetivas futuras .....	15
3.1.	Tecnologia CNC .....	15
3.1.1.	Evolução da tecnologia CNC .....	15
3.1.2.	Equipamentos CNC .....	18
3.1.3.	Sistemas de aperto, fixação e calibração .....	23
3.1.4.	Ferramentas de corte .....	28
3.1.5.	Futuro da tecnologia CNC .....	34
3.2.	Sistemas CAD/CAM .....	41
3.2.1.	Evolução dos sistemas de CAD/CAM .....	41
3.2.2.	Futuro dos sistemas CAD/CAM .....	42
4.	Descrição das principais etapas envolvidas na maquinação de um pedido .....	45
4.1.	Preparação da produção .....	45
4.2.	Sistemas de posicionamento e fixação .....	46
4.3.	Cadeia de Cotas - cotas funcionais versus cotas de fabrico .....	47
4.4.	Cotas das peças brutas para maquinação -sobre espessuras .....	49
4.5.	Escolha das superfícies de partida para maquinação .....	50
4.6.	Seleção das ferramentas de corte .....	51
4.7.	Limitações dimensionais, geométricas e tecnológicas associadas à maquinação .....	52
4.8.	Definição de sequência de maquinação .....	52
5.	Casos de Estudo .....	55
5.1.	Controlo Dimensional de uma peça prismática simples .....	55
5.1.1.	Introdução .....	55
5.1.2.	Metodologia .....	55
5.1.3.	Resultados .....	58
5.1.4.	Conclusão .....	60
5.2.	Controlo Dimensional de uma peça complexa .....	61
5.2.1.	Introdução .....	61
5.2.2.	Metodologia .....	61
5.2.3.	Resultados .....	63
5.2.4.	Conclusão .....	65
5.3.	Maquinação a 3 eixos e Controlo Dimensional .....	65
5.3.1.	Introdução .....	65
5.3.2.	Preparação da produção .....	66
5.3.3.	Maquinação .....	68
5.3.4.	Controlo dimensional e geométrico .....	90
5.3.5.	Conclusões .....	94
5.4.	Otimização de uma fase de maquinação a 5 eixos .....	96
5.4.1.	Introdução .....	96
5.4.2.	Preparação da produção .....	97

5.4.3.	Maquinagem.....	99
5.4.4.	Resultados .....	111
5.4.5.	Conclusões .....	112
5.5.	Maquinagem de peça simples em torno .....	113
5.5.1.	Introdução .....	113
5.5.2.	Preparação da produção .....	113
5.5.3.	Maquinagem.....	114
5.5.4.	Conclusões .....	118
5.6.	Caso da quebra de ferramenta .....	119
5.6.1.	Introdução .....	119
5.6.2.	Análise .....	120
5.6.3.	Sugestões de melhoria.....	121
5.6.4.	Conclusões .....	121
6.	Conclusões e trabalhos futuros.....	123
6.1.	Conclusões .....	123
6.2.	Caso da quebra de ferramenta .....	124
	Referências .....	125
	Anexos.....	i
I.	Etapas para medição numa CMM com uso do PC-DMIS e algumas considerações .....	ii
II.	Desenho de Definição do caso de estudo 4 .....	vi
III.	Relatórios Gerados - Caso de estudo 3 .....	vii
IV.	Ficha Sequencial Tipo máquina - Caso estudo 3 .....	ix
V.	Caso de Estudo 4 – Relatório Sequencial .....	xiii
VI.	Características das operações do caso de estudo 4.....	xvi
VII.	Etapas de maquinagem (vista Software)– Caso de estudo 5 .....	xvii
VIII.	Código ISO gerado – Caso de estudo 5 .....	xix
IX.	Outros Relatórios de trabalhos diversos realizados na fábrica .....	xx

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores atuais possíveis recorrendo a máquinas CNC [17].....	19
Tabela 2 - Propriedades dos materiais para ferramentas [26].....	30
Tabela 3 - Principais características dos sistemas de fixação na árvore [27].....	31
Tabela 4 - Tipos de sistemas de aperto disponíveis para cada tecnologia .....	46
Tabela 5 - Representação do aperto em desenho de engenharia.....	47
Tabela 6 - Exemplos de simbologia associados à fixação de uma peça [28].....	47
Tabela 7 - Intervalos de tolerância económicos para cada operação [28] .....	49
Tabela 8 - Valores típicos de sobre espessura mínima para diferentes modos de maquinagem [28] .....	49
Tabela 9 - Limitações tecnológicas da maquinagem .....	52
Tabela 10 - Relatório dimensional gerado para o caso de estudo 1 .....	58
Tabela 11 - Resultados da medição por CMM do caso de estudo 3 .....	94

## Índice de Figuras

Figura 1 - As instalações da empresa .....	3
Figura 2 - Gráfico das Diferentes Tecnologias e Máquinas na Fábrica .....	4
Figura 3 - Fabricantes de fresadoras CNC na fábrica e controladores .....	5
Figura 4 - Nº Licenças de Software CAD/CAM .....	5
Figura 5 - Layout fábrica em fevereiro de 2017 .....	6
Figura 6 - Layout fábrica em junho de 2017 .....	6
Figura 7 - Posto de trabalho .....	7
Figura 8 - Vários instrumentos de precisão disponíveis .....	8
Figura 9 - Fluxo das encomendas .....	8
Figura 10 - Fluxo da Produção .....	9
Figura 11 - Software Produção .....	9
Figura 12 - Armário com as ferramentas novas .....	11
Figura 13 - Alguns equipamentos de medida em chão de fábrica .....	12
Figura 14 - CMM disponíveis no gabinete de metrologia .....	13
Figura 15 - Primeiro centro de maquinação manual .....	15
Figura 16 - Torno de Rose, um torno geométrico .....	15
Figura 17 - Mecanismos programados com linguagem específica .....	16
Figura 18 - As primeiras CMM .....	17
Figura 19 - Tecnologias das Máquina-ferramenta CNC .....	19
Figura 20 - Eixos de Translação e Rotação .....	20
Figura 21 - Tecnologias de fresagem CNC .....	20
Figura 22 - Interior de uma máquina <i>multitasking</i> .....	21
Figura 23 - Exemplo de uma peça maquinada numa <i>multitasking</i> .....	21
Figura 24 - Máquina CNC com troca de paletes incorporada .....	22
Figura 25 - Gráfico Flexibilidade vs Produtividade do FMS .....	23
Figura 26 - Sistemas convencionais de fixação .....	24
Figura 27 - Sistemas de aperto com aplicações específicas .....	25
Figura 28 - Tecnologias para referenciar uma peça CNC .....	26
Figura 29 - Tecnologias de calibração de ferramenta .....	27
Figura 30 - Ferramentas para fresadora CNC .....	28
Figura 31 - Ferramentas para operações de furação e roscagem .....	29
Figura 32 - Tipos de ferramentas para operações de torneamento .....	29
Figura 33 - Gráfico comparativo das propriedades dos materiais de cada tipo de ferramentas [24] .....	30
Figura 34 - Tecnologias de porta-ferramenta .....	31
Figura 35 - Exemplo de tecnologias de porta-ferramenta na empresa .....	32
Figura 36 - Tipos de armazéns CNC [28] .....	32
Figura 37 - Torreta de um torno .....	33
Figura 38 - Tipos de armazéns presentes na fábrica .....	33
Figura 39 - Dispositivos de afiação de ferramentas .....	34
Figura 40 - Tecnologias CNC para uso doméstico .....	35
Figura 41 - Tecnologias de maquinação de peças complexas .....	36
Figura 42 - Fundição de um entalhe numa CNC híbrida .....	36
Figura 43 - INTEGREX i-400AM da Mazak [31] .....	37
Figura 44 - Tecnologias de electroerosão por fio .....	37
Figura 45 - Sistemas de 5 eixos aplicados às electroerosoras .....	38
Figura 46 - Sistema multiferramentas para torno – Sandvick .....	38
Figura 47 - Tecnologias de medição sem contacto .....	39
Figura 48 - Hexagon - CMM com múltiplos sensores .....	39
Figura 49 - Sistema de ponteira de 5 eixos da Renishaw .....	40
Figura 50 - Tecnologias de metrologia com portabilidade .....	40
Figura 51 - Sistema DAC-1 e componentes associados .....	41
Figura 52 - Evolução do CAD .....	42
Figura 53 - Exemplos de boas e más escolhas de aperto .....	46
Figura 54 - Exemplo de simbologia .....	47
Figura 55 - Exemplo representativo da realização da cotação de fabrico .....	48
Figura 56 - Exemplo - Cadeia de cotas .....	48

---

Figura 57 - Exemplo do cálculo da sobre-espessura.....	50
Figura 58 - Seleção de superfície de partida da maquinação .....	50
Figura 59 - Desenho Técnico Caso estudo 1 .....	56
Figura 60 - Representação dos pontos do alinhamento inicial .....	57
Figura 61 - Cotas e Localização dos Furos da peça do caso de estudo 1.....	57
Figura 62 - Segundo alinhamento.....	59
Figura 63 - Segundas medições com perspetiva 3D.....	60
Figura 64 - Modelo 3D da peça complexa.....	61
Figura 65 - Desenho de definição do caso de estudo 2.....	62
Figura 66 - Alinhamento do caso de estudo 2 .....	63
Figura 67 - Resultados da medição por CMM do caso 2 (1) .....	64
Figura 68 - Resultados da medição por CMM do caso 2 (2) .....	64
Figura 69 - Resultados da medição por CMM do caso 2 (3) .....	65
Figura 70 - Modelo 3D da peça do caso de estudo3.....	66
Figura 71 - Desenho técnico do caso de estudo 3 (Anexo2).....	67
Figura 72 - Algumas operações efetuadas na Fase 10 .....	71
Figura 73 - peça após a fase 10 .....	74
Figura 74 - Facejamento inferior e controlo dimensional após a fase 10 .....	74
Figura 75 - Operações Fase 20 .....	75
Figura 76 - Controlo dimensional de um elemento conforme a ficha de fase .....	77
Figura 77 - Operações realizadas na fase 30 e referencial origem peça .....	78
Figura 78 - Algumas operações da Fase 40 .....	80
Figura 79 - Peça após a fase 40 .....	80
Figura 80 - Esquema de programação para quebrar arestas .....	82
Figura 81 - Operações Fase 50 completa.....	83
Figura 82 - Etapas da Fase 50.....	90
Figura 83 - Exemplo de um programa e medições efetuadas .....	90
Figura 84 - Medição da peça na CMM 5 eixos .....	91
Figura 85 - Exemplo de alinhamento .....	91
Figura 86 - Medição na CMM 3eixos com a câmara de visão .....	92
Figura 87 - Interface do programa com uso da visão .....	92
Figura 88 - Relatório dimensional gráfico do caso de estudo 3.....	93
Figura 89 - Peças embaladas e prontas para envio .....	95
Figura 90 - Modelo 3D do caso de estudo 4.....	96
Figura 91 - Matéria-prima para maquinação do caso de estudo 4.....	97
Figura 92 - Desenho técnico do caso de estudo 4.....	98
Figura 93 - Peça após maquinação.....	99
Figura 94 - Sistema de aperto utilizado .....	99
Figura 95 - Ferramentas utilizadas para aumentar a produtividade da maquinação.....	100
Figura 96 - Fresagem com disco em T .....	109
Figura 97 - Programação da operação do rasgo.....	110
Figura 98 - Controlo dimensional manual .....	113
Figura 99 - Modelo 3D com corte da peça do caso de estudo 5 .....	114
Figura 100 - Aperto do bruto no torno CNC .....	114
Figura 101 - Representação da peça a maquina no bruto .....	116
Figura 102 - Ambiente de programação de torno com Mastercam .....	116
Figura 103 - Peça com defeito devido a erro de maquinação.....	118
Figura 104 - Ferramenta quebrada.....	119
Figura 105 - Elemento maquinado durante a quebra da ferramenta .....	120
Figura 106 - Diagrama de funções da Ferramentaria .....	121

## Lista de Abreviaturas

**NC** – Numeric Control

**CNC** - Computer Numeric Control (Controlo Numérico Computarizado)

**CAM** - Computer Aided Manufacturing (Manufatura Auxiliada por Computador)

**CAD** - Computer Aided Design (Desenho Auxiliado por Computador)

**CMM**- Coordinate Measuring Machine (Máquina de Medição por Coordenadas)

**FF&I** – Fernando Ferro & Irmão S.A.

**EDM** -Electrical Discharge machine (Electroerosora)

**3D** – Tridimensional

**ATC** - Automatic Tool Change (Dispositivos de troca de ferramenta)

**APC** - Automatic Pallet change (Troca automática de paletes)

**APT** - Automatically Programmed Tool

**DAC** - Design Augmented by Computer (Desenho aumentado por computador)

**MLQ** – Minimal Quantity of Lubricant (Lubrificação por quantidade mínima)

**FMS** – Flexible Manufacturing Systems (Sistemas de Manufatura Flexíveis)

**HSS** - High Speed Steel (Aço rápido)

**MD** - Metal Duro

**C** - Ceramic

**CT** - Cermet

**Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>** - Cermet à base de óxido de alumínio

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** - Cermet à base de nitreto de silício

**CBN** – Cubic Boron Nitride (Nitreto de Boro Cúbico)

**PCD** – Polycrystalline Diamond (Diamante policristalino)

**HTML** - HyperText Markup Language (Linguagem de Marcação de Hipertexto)

**V<sub>c</sub>** - Velocidade de corte

**V<sub>f</sub>** - Velocidade de avanço

**n** - Velocidade do fuso ou velocidade de rotação

**D<sub>cap</sub>** – Diâmetro de maquinagem

**Z<sub>c</sub>** - Número efetivo de dentes da fresa

**f<sub>z</sub>** - Avanço por dente

**f<sub>n</sub>** - Avanço por rotação



# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

Nos dias atuais, vivemos num meio onde o continuo desenvolvimento da tecnologia requer que a indústria adote uma postura mais dinâmica e adequada às necessidades do mercado.

Este desenvolvimento deveu-se principalmente à rápida evolução dos meios tecnológicos de fabrico que permitiu que a produção fosse cada vez mais célere e de melhor qualidade.

Por sua vez, a informática, a eletrónica, a precisão das máquinas-ferramenta, os meios de controlo e a melhoria da qualidade dos materiais, tornou possível a evolução contínua dos meios de produção.

Isto não é diferente para a indústria metalomecânica, onde os processos antigamente dados como válidos, já não se encontram totalmente adaptados à realidade dos nossos dias, o que obriga este sector a evoluir para atender às necessidades dos mercados e às oportunidades que surgem, de modo a assegurarem a sua sustentabilidade e manterem-se competitivas, implicando a criação de novos serviços e produtos com a introdução no mercado em tempos cada vez mais curtos e com maior valor acrescentado.

Neste tipo de indústrias em especial, tem-se verificado um encurtamento do ciclo de vida dos produtos, o que leva à produção de pequenas e médias séries de peças produzidas em alumínio ou outros materiais que permitam uma maquinação mais rápida e com custos mais reduzidos.

Neste panorama, de um mercado e um setor em constante crescimento e de grande desenvolvimento tecnológico, torna-se uma realidade o fabrico de peças de elevada precisão, de elevado nível de complexidade e elevada velocidade.

Torna-se assim necessário a utilização de centros de maquinação CNC, para que este cenário e esta realidade seja possível nos dias de hoje.

## 1.2. Motivação

Num mercado onde muitos fatores têm sofrido grandes mudanças a nível das tecnologias, produção e requerimentos do cliente, a Fernando Ferro & Irmão é uma empresa que pretende estar na frente desta evolução, apostando no investimento de tecnologias avançadas, em novas formas inovadoras de gestão da produção e trabalho com novos materiais, saindo, assim, da zona de conforto e apostando na inovação e crescimento da empresa e da indústria em Portugal.

Por estes motivos, o estudo e acompanhamento das metodologias adotadas por esta empresa seriam um ponto de estudo muito interessante refletindo o mercado da maquinação de precisão no país, e, ao mesmo tempo, desafiante para tentar encontrar soluções inovadoras que tragam benefício à empresa.

Assim, pretende-se estudar sobre as tecnologias utilizadas atualmente, através do contato pessoal com um ambiente de aplicação das mesmas, e sobre quais as tecnologias que fazem mais sentido adaptar e investir do futuro para assegurar um crescimento económico sustentável e competitivo.

## 1.3. Objetivos

Os objetivos pretendidos com este estágio são:

- Compreensão da realidade do meio indústria metalomecânica portuguesa e adaptação à mesma;
- Estudo da metodologia de trabalho utilizada por uma empresa no ramo da maquinação de precisão, mais focado na área produtiva.
- Levantamento do estado de arte da tecnologia CNC atual e seu futuro, tentando adaptar algumas soluções inovadoras à realidade da empresa de acolhimento.
- Elaboração de um projeto para maquinação e sua produção tendo como base os processos utilizados pela empresa e proceder à sua eventual otimização.

## **1.4. Organização do Documento**

No capítulo 2, é exposto a realidade da empresa de acolhimento, assim como as tecnologias disponíveis e os métodos de trabalho utilizados.

No capítulo 3, é abordado, em primeiro lugar, a história da tecnologia CNC e as suas origens, as tecnologias disponíveis atualmente e uma breve referencia a tecnologias emergentes e que poderão tornar-se o futuro na maquinação CNC. É abordando ainda neste capítulo a história, presente e expectativas de futuro de outras tecnologias ligadas ao CNC, designadamente a tecnologia CAD/CAM.

No capítulo 4, espera-se ilustrar os principais pontos necessários ao processo de preparação e elaboração da maquinação CNC.

Embora a maquinação CNC, hoje em dia, seja um processo muito iterativo, neste capítulo abordamos algumas ferramentas e processos que permitem obter melhores resultados na maquinação CNC.

O capítulo 5, corresponde aos casos de estudo realizados em fábrica. Embora não se englobe todos os casos de estudo realizados, pretende-se mostrar um pouco de todos os recursos e tecnologias utilizado na empresa com o qual se teve contacto direto, desde metrologia com uso de CMM, maquinação com fresadora CNC a 3 e 5 eixos e maquinação com uso de torno CNC.

Além disso, engloba-se, ainda, alguns outros casos inerentes à maquinação CNC, como a quebra e desgaste de ferramentas.

## 2. A empresa Fernando Ferro & Irmão

### 2.1. Apresentação

A Fernando Ferro & Irmão, S.A. (**figura 1**) é uma empresa de metalomecânica de precisão, situada em Estarreja. Os seus serviços estendem-se aos mais diversos setores de atividade, tendo como exemplos o setor automóvel, da eletrónica, dos moldes, e do fabrico de máquinas e peças mecanizadas.



**Figura 1 - As instalações da empresa**

Ao longo dos seus 18 anos de existência, a Fernando Ferro & Irmão, S.A., tem vindo a crescer e a expandir-se não só no mercado nacional como internacional, prestando serviços a países como Alemanha, França, Inglaterra e EUA. De facto, a valorização e investimento, na inovação tecnológica, bem como nos seus recursos humanos, que são altamente motivados e qualificados, têm contribuído para que esta empresa esteja na linha da frente do setor em que opera.

Todos estes fatores constituem a base para o desenvolvimento sustentado da empresa, concretizando a sua Missão e a sua Visão. A Missão da empresa prende-se com a produção de maquinação de precisão de peças e componentes em ligas metálicas, compósitos e plásticos de engenharia, que vão ao encontro das necessidades dos seus clientes. Já a sua Visão é definida da seguinte forma: “onde quer que estejamos queremos ser uma empresa de referência na área da metalomecânica de precisão”.

A Fernando Ferro & Irmão, S.A. apresenta uma Política de Qualidade que visa a satisfação das necessidades e expectativas dos seus clientes, através da procura da excelência e conformidade dos seus produtos. Nesse sentido, a empresa assume os seguintes compromissos:

- Garantir elevados níveis de excelência dos seus produtos, construindo uma relação de parceria com clientes e fornecedores, sustentada no cumprimento rigoroso dos compromissos acordados e de todos os requisitos aplicáveis;
- Otimizar os Custos a todos os níveis da Empresa, através da gestão dos processos;
- Promover o desenvolvimento pessoal e profissional dos colaboradores, encorajando o espírito de equipa, a iniciativa, a inovação e a produtividade, com base na lealdade, empenho e comprometimento de todos;
- Cumprir os requisitos e promover a melhoria contínua do Sistema de Gestão da Qualidade.

Em 2016, é distinguida como “uma das 100 melhores empresas para trabalhar em Portugal”, pela revista “Exame”.

A Fernando Ferro & Irmão, S.A. faz ainda parte da nova geração de empresas que abandonaram o modelo de desenvolvimento na mão-de-obra barata e que optaram por um novo modelo de aposta na qualidade, necessária a uma estratégia rigorosa e bem definida.

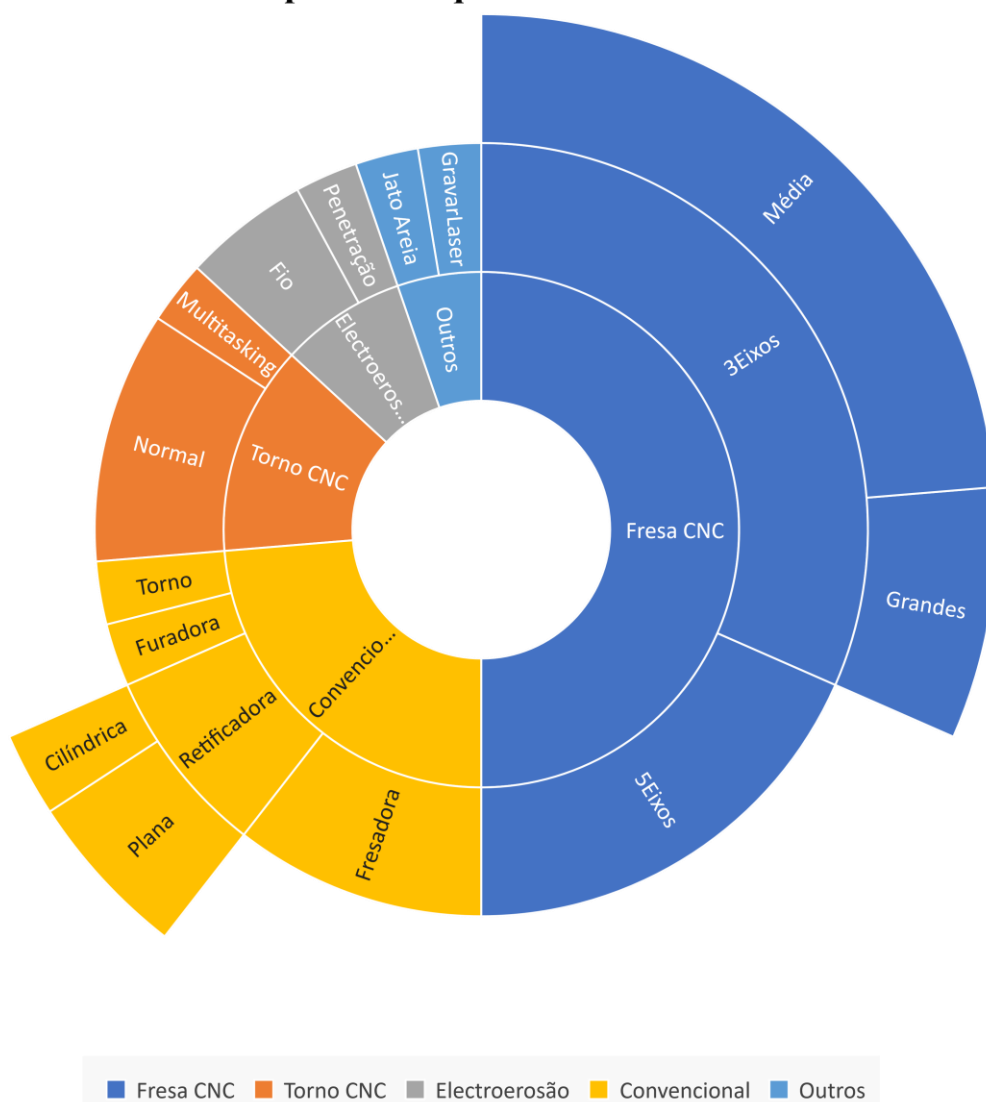
## 2.2. Equipamentos e Tecnologia

Uma das grandes medidas desta empresa é o seu forte investimento em novas tecnologias e equipamentos, apostando sempre no desenvolvimento tecnológico e formação dos colaboradores. Este investimento é efetuado em grande parte na aquisição de novas máquinas Controlo Numérico Computorizado CNC, que visam a melhoria do rendimento e precisão dos recursos disponíveis, e na compra de software especializado e focalizado nas necessidades da empresa e dos colaboradores.

Embora seja feito um investimento muito forte, a empresa tem um grande número de máquinas CNC mais antigas, que têm uma função igualmente importante do fabrico das peças, sendo usadas para a maquinação de peças de menor rigor dimensional ou para operações de desbaste.

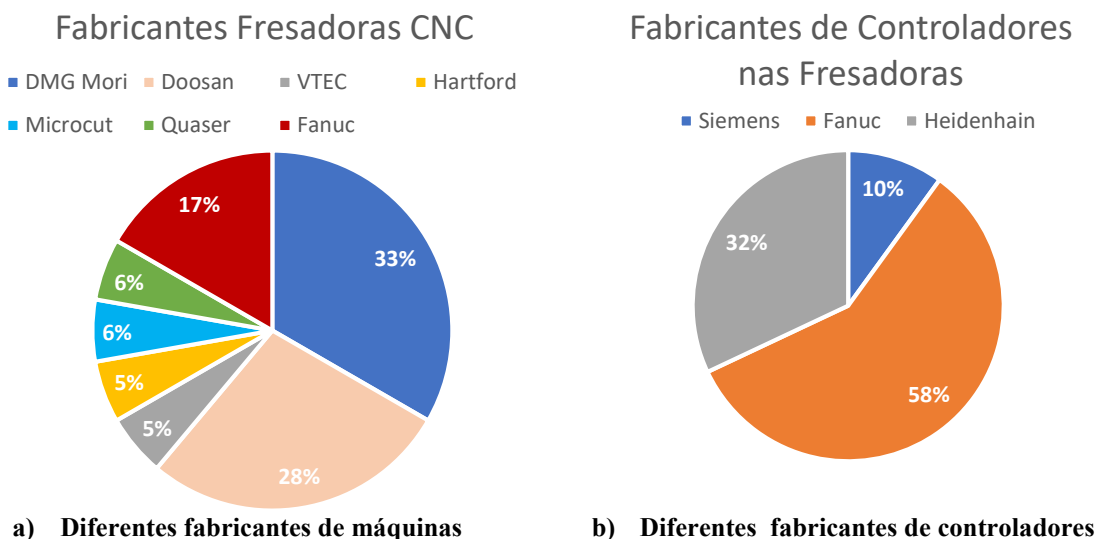
É importante salientar que o investimento feito em material atualizado não é realizado numa perspetiva de renovação da maquinaria, mas sim no sentido de complementar e melhorar os serviços já disponibilizados pela empresa, sendo que o crescimento gerado leva ao aperfeiçoamento do *know-how* disponível na empresa e na diversidade e quantidade de tecnologia CNC (**figura 2**). Neste sentido, apesar da grande quantidade de maquinaria atualizada, a empresa ainda tem um elevado volume de máquinas CNC mais antigas, que desempenham uma função igualmente importante no fabrico das peças, mais especificamente na maquinação de peças de menor rigor dimensional ou em operações de desbaste.

**Tipos de máquinas existentes**



**Figura 2 - Gráfico das Diferentes Tecnologias e Máquinas na Fábrica**

Esta diversidade gerada pela quantidade de máquinas, não se restringe às diferentes tecnologias correspondentes, mas estende-se aos próprios fabricantes de máquinas CNC e controladores (**figura 3**), o que constitui um fator muito importante para a empresa e respetivos operadores. Para os funcionários o acesso diário a tecnologias diferentes, novos desafios e oportunidades de aprendizagem, funciona como um agente motivacional. Já para a empresa os benefícios são igualmente favoráveis, dado que para além de disponibilizar aos seus clientes uma oferta cada vez mais abrangente e de melhor qualidade, tem a vantagem de abarcar colaboradores motivados e qualificados que, consequentemente, apresentam um melhor rendimento.

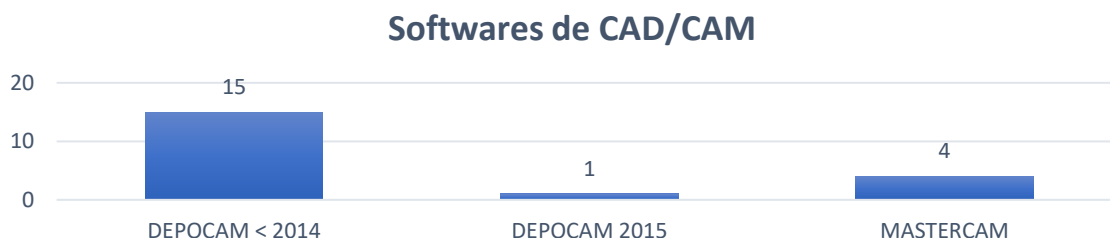


**Figura 3 - Fabricantes de fresadoras CNC na fábrica e controladores**

Um outro aspeto igualmente importante prende-se com a escolha de softwares diferentes (**figura 4**) para as fresadoras e para os tornos CNC, nos quais são utilizados o DepoCam e o MasterCam, respetivamente.

O DepoCam, embora menos conhecido, é um *software* com características muito apelativas, que o tornam numa opção muito válida para a indústria. Trata-se de um *software* intuitivo, simples e gráfico, não deixando, no entanto, de possibilitar o uso de programação mais complexa. Por outro lado, a maquinação a 5 eixos contínuos apenas se tornou possível a partir da versão de 2015, a qual, contrariamente à maquinação de 3 eixos, se torna mais difícil, trabalhosa e, por vezes, um pouco confusa. Da mesma forma a realização de operações mais complexas requer um operador mais experiente, dado que para tornar o software mais simples algumas operações mais específicas foram guardadas em menus menos utilizados.

Por sua vez, o MasterCam é um software universal e poderoso. Na empresa, em particular é utilizado nos tornos CNC, uma vez que permite funcionalidades como a maquinação por perfil de forma mais simplificada. Por este motivo torna-se numa escolha mais válida, relativamente ao DepoCam, quando o objetivo é a programação em torno.



**Figura 4 - N° Licenças de Software CAD/CAM**

A existência de uma única versão do DepoCam 2015, e que é o único software que permite a programação a 5 eixos contínuos, é um dos principais motivos para a pouca utilização e exploração dessa tecnologia.

### 2.3. Layout da empresa

A empresa mudou de instalações há relativamente pouco tempo e, como continua em constante crescimento, o layout da fábrica (**figura 5**) vai sofrendo alterações para se adaptar às tecnologias adquiridas e às necessidades da empresa. Por este motivo tornou-se necessário adotar uma estratégia de layout adaptável e móvel até atingir uma estabilidade no mesmo.

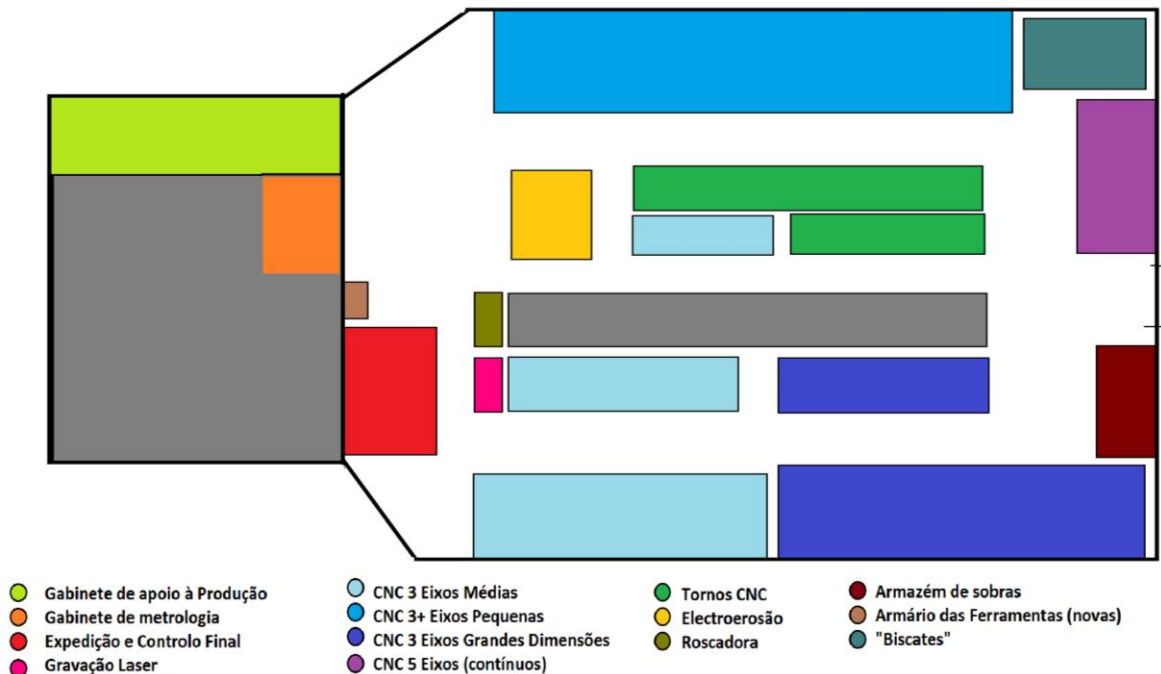


Figura 5 - Layout fábrica em fevereiro de 2017

Entretanto, no decorrer do período do estágio, por motivos relacionados com a organização e otimização do tempo e do espaço, foi necessária uma reestruturação do layout inicial, obtendo-se o layout atual (**figura 6**), este muito mais compacto e ainda com espaço para acrescentar mais máquinas e tecnologias como a ferramentaria está a ser construída.

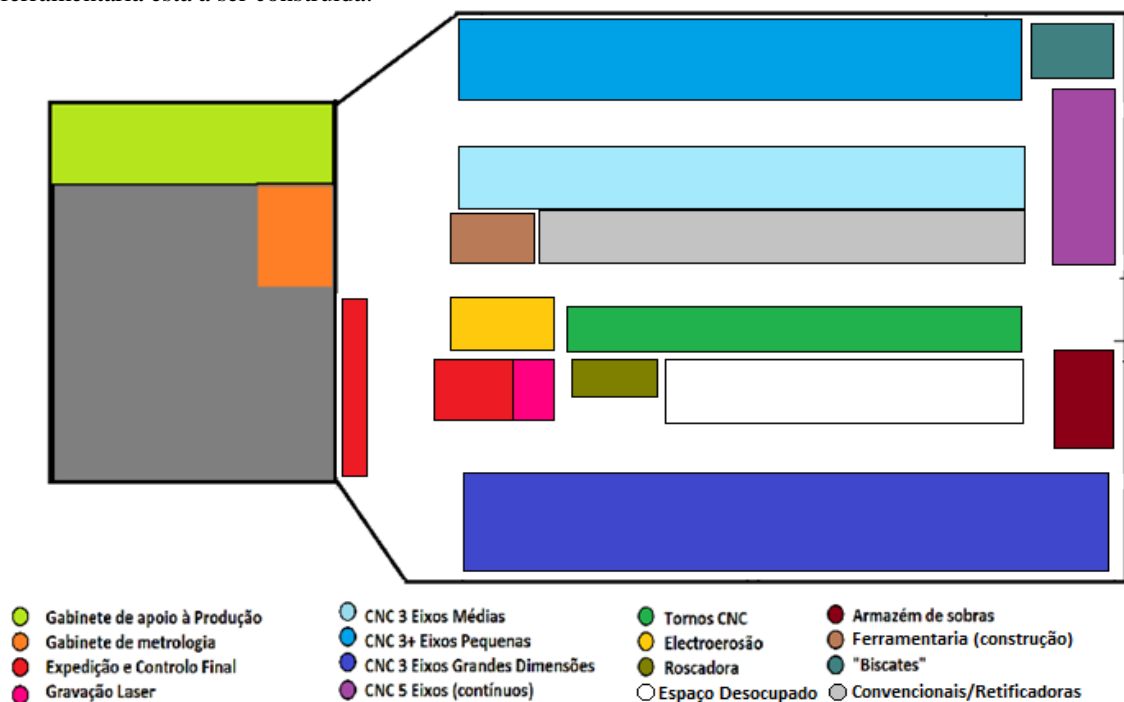


Figura 6 - Layout fábrica em junho de 2017

## 2.4. Organização do trabalho

Como a empresa trabalha maioritariamente em pequenas séries, para tirar um maior aproveitamento e rentabilidade das máquinas, foi adotado um sistema de trabalho inovador na produção. Este sistema consiste em substituir o “convencional” gabinete de CAD/CAM (onde se programava os ficheiros posteriormente descarregados na máquina CNC e colocados em funcionamento pelo operador), por um posto CAD/CAM para cada máquina, no qual o operador tem as funções de programador e operador da CNC. Este novo método permite evitar eventuais erros de comunicação entre o gabinete e o operador e agiliza o processo de produção, ao permitir uma programação mais rápida e adaptada às necessidades da empresa. Como podemos concluir, para este sistema funcionar é necessário investir em colaboradores qualificados, ou na qualificação dos já contratados, e na aquisição de licenças de *software* CAD/CAM para cada posto, com vista a programação individual.

Como cada operador CNC é também um programador CAD/CAM, cada posto de trabalho (**figura 7**) está equipado com um computador com o *software* CAD/CAM respetivo e ligação à rede e aos servidores da empresa, onde se encontram os desenhos e modelos 3D das peças essenciais para a programação e controlo dimensional. Cada posto tem ainda um pequeno armário que permite aos operadores guardar ferramentas, cones porta-ferramenta, calços, literatura de apoio, e outros equipamentos que sejam úteis e necessários ao trabalho. O operador CNC tem, assim, a obrigação de manter o seu posto limpo e organizado, e tornar a fábrica mais limpa e produtiva.



**Figura 7 - Posto de trabalho**

Cada operador tem um paquímetro próprio para realizar o controlo dimensional da peça durante e após o processo de maquinagem. Para cotas que exijam maior rigor dimensional ou complexidade, os operadores têm acesso a uma prateleira com diversos equipamentos de medição, desde micrómetros analógicos de formas e tamanhos diversos, sistemas de fixação, blocos padrão, calibres passa/não passa, entre outros (**figura 8**).

Para outras medições de superfícies complexas, tolerâncias mais apertadas na ordem dos micrómetros ( $10^{-6}$ m) ou medição de rugosidades, o operador pode recorrer ao Gabinete de Metrologia, o qual está equipado com máquinas de medição por coordenadas (CMM), rugosímetros e outros equipamentos calibrados.





Figura 8 - Vários instrumentos de precisão disponíveis

## 2.5. Gestão da produção

A gestão e organização da produção está a cargo do gabinete de produção, que desempenha funções específicas como receber as encomendas dos clientes, verificar a sua exequibilidade, tendo em conta os trabalhos já aceites, e, se necessário, negociar os prazos das mesmas. Uma encomenda, geralmente, segue o seguinte procedimento fixo (**figura 9**) e já bem implementado na empresa.

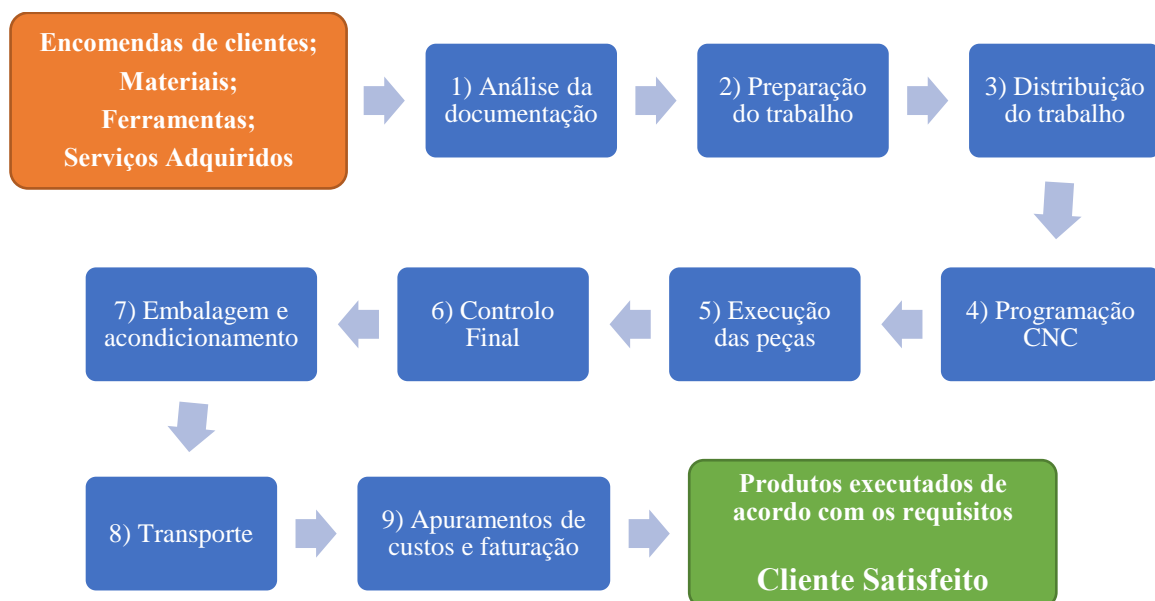


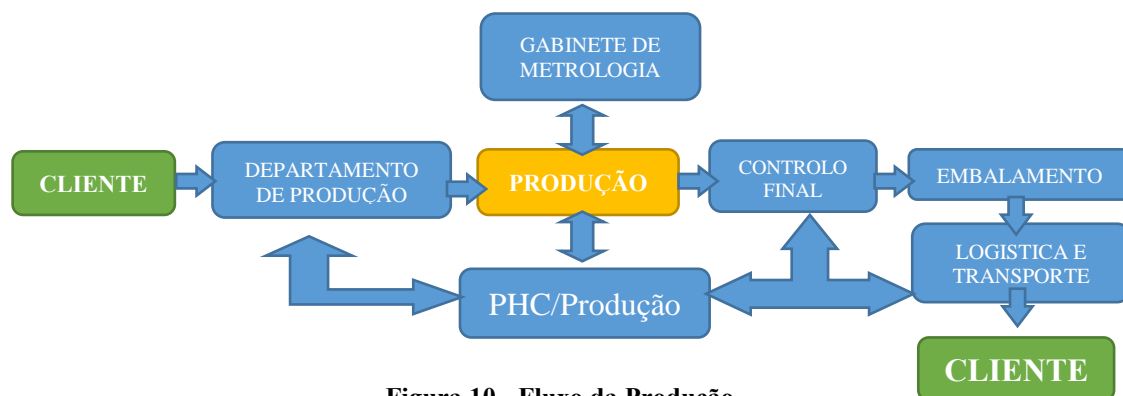
Figura 9 - Fluxo das encomendas

- 1) Verificar se a execução da encomenda é economicamente viável, se há disponibilidade de meios para a sua maquinação e se as tecnologias disponíveis na empresa permitem a sua execução. Se estes pontos forem aceites, é verificado se os documentos enviados são suficientes para a maquinação da encomenda sem qualquer impedimento;
- 2) Criação de uma obra associada à encomenda para possibilitar a sua monitorização e controlo e de outros elementos necessários para a produção na mesma. Criação de uma pasta na base de dados da empresa, com os documentos necessários para a maquinação que estará disponível ao operador e encomenda do bruto;
- 3) Distribuição do bruto encomendado referente à peça é feita tendo em conta a tecnologia mais adequada para a maquinação e a disponibilidade das máquinas;
- 4) Realização da programação recorrendo a sistemas CAD/CAM e seu armazenamento na base de dados da empresa;
- 5) Maquinação e controlo das peças pelo operador CNC;



- 6) O controlo final é feito por uma equipa própria que verifica a conformidade, aspeto e quantidade das peças maquinadas e ainda se é necessário algum serviço extra maquinagem, como por exemplo a gravação a laser ou tratamentos térmicos ou superficiais.
- 7) Acondicionamento das peças e agrupamento por obra;
- 8) Quando a obra/encomenda está completa deve efetuar-se o transporte para o cliente, para que a encomenda seja entregue o mais breve possível e o cliente fique satisfeito com o serviço;
- 9) O preço final da peça tem em conta os tempos de maquinagem, o custo da matéria-prima e os custos dos tratamentos se existentes. Todos estes fatores estão guardados da obra que foi criada inicialmente, o que torna o processo de faturação muito simples.

Considerando as informações anteriores e a experiência na fábrica ao longo do estágio, pode-se esquematizar de uma forma simplificada todo o fluxo de produção utilizado pela empresa (**figura 10**), tendo em conta as suas funções e as iterações dos principais intervenientes no processo de produção.

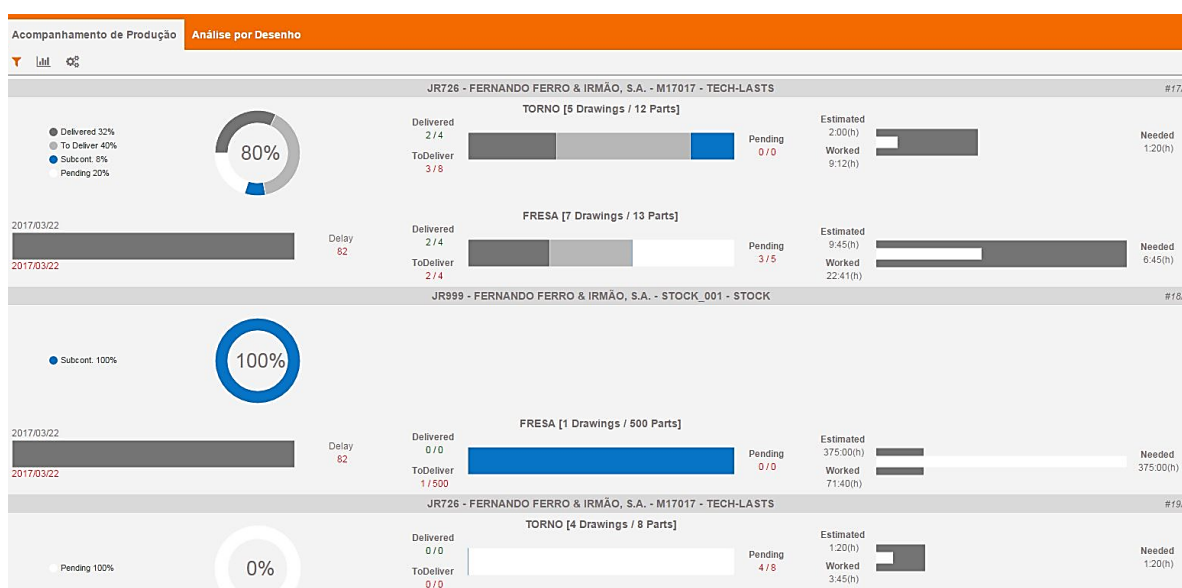


**Figura 10 - Fluxo da Produção**

Para o armazenamento e gestão dos dados correspondentes às obras realizadas, a empresa recorre fundamentalmente a dois softwares que interagem entre si: o PHC e o Produção.

O PHC é um software de gestão e organização das obras/encomendas que permite a divisão das encomendas por obras, que são organizadas de acordo a data do pedido e a data limite de entrega dessas mesmas peças.

O PHC é complementado pelo software **Produção** (**figura 11**), criado especificamente para a empresa em plataforma HTML, que tem como finalidade o acompanhamento das obras ativas em chão de fábrica e a organização das mesmas em base de dados.



**Figura 11 - Software Produção**

Este software permite ao utilizador:

- Uma rápida compreensão do estado atual de cada obra.
- O estado atual de cada peça:
  - *Delivered* – Peças já enviadas para o cliente.
  - *To Deliver* – Peças acabadas e em espera para serem enviadas para o cliente.
  - *Subcontract* – Peça está numa empresa subcontratada para tratamentos térmicos ou semelhantes.
  - *Pending* – Peças em processo de maquinação ou que ainda não foram começadas.
    - Se uma peça já se encontra a ser trabalhada, então esse tempo de maquinação pode ser verificado, num submenu onde está discriminado o estado de cada peça individual.
- A percentagem das peças terminadas referentes a uma determinada obra.
  - Este fator é importante, uma vez que permite saber quais as peças que faltam para finalizar a encomenda e, se necessário, colocar essas peças como prioridade de maquinação para serem enviadas para o cliente o mais rápido possível.
- Saber qual os tempos estimados de maquinação e quais os tempos reais.
  - Importante para a faturação e levantamento dos custos da obra.
  - Importante para futuras melhorias no processo de maquinação e estimativas iniciais.
- Como é criado em HTML pode, no futuro, ser adaptado para estar disponível através de qualquer *browser* em qualquer parte do mundo.

Apesar da organização das obras ser realizada pelo gabinete, o processo de maquinação e produção das peças não tem uma sequência definida. Isto deve-se à variedade das encomendas e, por isso, o processo de produção muitas vezes adapta-se à disponibilidade das máquinas.

Esta falta de uma sequência lógica no processo de maquinação, implica que sejam os próprios operadores a definir a sequência de maquinação, e, portanto, pessoas diferentes com diferentes níveis de experiência. Desta forma, o processo fica sujeito a erros na lógica de maquinação, o que pode significar a impossibilidade de maquinar a peça da forma idealizada e, conseqüentemente, o envio da peça para outra máquina que permita as operações em falta (o que leva a um aumento desnecessário do tempo de maquinação) ou o recomeço da mesma. Neste último caso, além do acréscimo ao tempo de maquinação, ainda é adicionado o tempo de espera de material e da repetição do processo de maquinação.

## 2.6. Gestão de Ferramentas

O método de gestão de ferramentas praticado é ainda um pouco rudimentar, o controlo do tempo de vida e localização das ferramentas é praticamente inexistente, sendo que a única divisão que é realizada entre é ferramentas novas e ferramentas usadas. As ferramentas novas encontram-se em *stock*, num armário que contém todas as ferramentas organizadas por tamanhos (**figura 12**). Uma vez utilizadas, as ferramentas deixam o armário das ferramentas novas e são levadas para o chão de fábrica sem qualquer tipo de controlo ou registo. Estas são depois utilizadas consoante as necessidades dos operadores e guardadas nos armazéns das máquinas CNC ou nos armários correspondentes a cada bancada de trabalho.

O único acompanhamento feito às ferramentas em chão de fábrica é realizado pelos operadores quando têm a necessidade de utilizar uma ferramenta específica. Se o operador não tem conhecimento da existência da ferramenta em chão de fábrica, vai verificar se existe alguma em *stock* no armazém de ferramentas e, em caso negativo, vai ter que procurar pela fábrica se existe alguma ferramenta que lhe permita a maquinação.

Se não encontrar nenhuma ferramenta que permita a maquinação terá que pedir ao departamento de compras a aquisição da ferramenta, que deverá rever e aprovar o pedido.

Todo este processo traz um aumento do tempo improdutivo das máquinas e pode mesmo significar a paragem da maquinação por dias.



**Figura 12 - Armário com as ferramentas novas**

## **2.7. Controlo Dimensional e Geométrico**

Para garantir as cotas pedidas pelo cliente, é necessário existir sempre um controlo das peças maquinadas, uma vez que existem muitas variáveis que podem influenciar o acabamento da peça.

Embora as máquinas CNC garantam precisões até mesmo de micrómetros, existem outros fatores, como o estado das ferramentas, aperto da peça, aperto e estabilidade da ferramenta e do cone porta-ferramenta, velocidades de corte e avanço, lubrificação, entre outros, que têm necessidade da intervenção direta do operador e se não estiverem em conformidade com as condições necessárias para a maquinação podem influenciar os resultados obtidos.

Claro que os operadores têm cuidado com estes pontos, mas por vezes as falhas acontecem. Daí a importância no controlo das peças pelo operador para confirmar o resultado da maquinação e verificar se todo o processo foi realizado sem erros.

Como cada peça é diferente, para ser medida com rigor, o método e equipamento de medição utilizados podem variar também. É por isso essencial uma gama de equipamentos de medição variada e que permita medições precisas e rigorosas.

Na empresa existe uma prateleira onde estão vários equipamentos de medição disponíveis a qualquer trabalhador para verificar o trabalho realizado (**figura 13**). Nesta prateleira podemos encontrar:

- Paquímetros digitais e analógicos
- Micrómetros de Exteriores
- Micrómetros de Interiores
- Micrómetros Interiores (Caliper Type)
- Micrómetros de Disco
- Micrómetro de profundidades
- Blocos padrão
- Sonda da máquina CNC
- Calibres Tampão (Passa/Não Passa)
- Comparadores analógicos

Além do controlo dimensional, o operador deve realizar também o controlo visual do aspeto final da maquinação, uma vez que é uma característica determinante para a satisfação do cliente com os serviços.

Caso a peça apresente sinais de marcar ou riscos, esta deve ser encaminhada para a retificação ou para o jato de areia para melhorar o aspeto das superfícies.



**a) Micrómetros de Exteriores**



**b) Micrómetros Interiores (Caliper Type)**



**c) Micrómetros de Interiores (3 pontos contacto)**



**d) Calibres Tampão (Passa/Não Passa)**



**e) Blocos Padrão**



**f) Micrómetro de profundidades ou Batímetro**

**Figura 13 - Alguns equipamentos de medida em chão de fábrica**

Para complementar os elementos de medição standard, a empresa também oferece um espaço devidamente climatizado e isolado equipado com instrumentos de metrologia altamente precisos, designadamente:

- CMM Hexagon Global Performance
- CMM Hexagon Optiv Classic
- Braço de apalpação (Romer multigage) (portabilidade)
- Blocos Padrão
- Cilindros Padrão
- Rugosímetro
- Comparadores
- Elementos standard devidamente calibrados e certificados

De todos os equipamentos mencionados, as duas CMM merecem uma referência adicional, uma vez que apresentam a tecnologia mais recente e as medições mais precisas. Ambas permitem a programação dos elementos a medir, de uma maneira análoga ao funcionamento das máquinas CNC, e recorrem a um software

próprio (PC-DMIS), assim como ao modelo 3D da peça para gerar trajetórias e obter pontos que serão utilizados para a medição da peça maquinada.

A Hexagon Global Performance (**figura 14a**) é uma máquina CMM que permite a medição em 5 eixos não contínuos, possíveis devido à tecnologia de indexação da sua cabeça. Assim, permite realizar medições em vários planos da peça sem que seja necessário reorientar a peça a medir.

Esta CMM também está equipada com uma ponteira de scan, que permite realizar medições mais rigorosas de superfícies complexas, dado que a ponteira percorre a superfície a medir (sempre em contato com a superfície) e guarda a trajetória real num conjunto de pontos que tira durante varrimento da superfície em questão. Esta trajetória pode ser posteriormente comparada com a superfície do modelo 3D em questão.

Por outro lado, a Hexagon Optiv Classic (**figura 14b**) não apresenta estas características da anterior, mas apresenta uma tecnologia igualmente interessante, que consiste em incorporar duas formas de medição na mesma máquina. Neste caso, esta CMM permite realizar medições através do uso de uma ponteira de apalpação ou através de um sistema de visão composto por uma câmara de alta precisão, sendo, por isso, designada de CMM híbrida.

A ponteira de apalpação realiza a aquisição de pontos por contacto com a peça e permite uma precisão elevada, enquanto o sistema de visão permite a medição de pormenores de dimensões muito reduzidas ou outros que não poderiam ser obtidos por contato, através das diferenças dos contrastes captados, que correspondem aos diferentes elementos da peça. Embora a medição por visão possibilite a medição de pormenores muito pequenos, a precisão associada às medidas obtidas é inferior à garantida pela ponteira de apalpação.



a) Hexagon Global Performance



b) Hexagon Optiv Classic

**Figura 14 - CMM disponíveis no gabinete de metrologia**



### 3. Estudo da evolução da tecnologia CNC e perspectivas futuras

#### 3.1. Tecnologia CNC

##### 3.1.1. Evolução da tecnologia CNC

A tecnologia CNC surge devido à necessidade e procura de precisão, repetibilidade e rentabilização do tempo e processo de maquinação.

Em 1774, John Wilkinson inventa uma máquina para furação de cilindros, tendo como finalidade a maquinação de canos para armas de fogo e canhões. Esta é a primeira máquina considerada pelos especialistas como impulsionadora da existência da tecnologia CNC [1] [2].

Entretanto o processo de maquinação manual auxiliada por máquinas foi melhorado após a primeira revolução industrial com a criação dos primeiros centros de maquinação convencionais em 1818 por Eli Whitney (figura 15) [3] e mais tarde de tornos automatizados mecanicamente, maioritariamente movidos por cames (1870s).

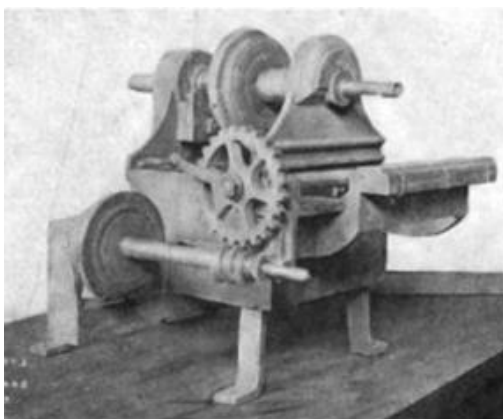


Figura 15 - Primeiro centro de maquinação manual

Estas máquinas automatizadas mecanicamente já existiam ao longo do tempo, sendo um exemplo dos seus inícios a “Rose Engine Lathe” ou torno de Rose (figura 16), que era um torno que com o auxílio de cames permita a elaboração de padrões simétricos em madeira semelhantes a flores com uma precisão e repetibilidade impossível de atingir manualmente. Estas máquinas estão na origem dos tornos geométricos que seriam mais tarde utilizadas para combater a falsificação das notas de banco e selos, e que iriam permitir a maquinação em alguns materiais metálicos [4].

Ao longo dos anos esta tecnologia de automatização foi aperfeiçoada, e nos anos 1870s, surgiram máquinas que usavam o sistema de cames como forma de automatizar todo o processo de maquinação desde o deslizamento, à indexação da torre. Estas máquinas ficaram conhecidas por “screw machines”, embora permitissem funções além da simples furação de material.



Figura 16 - Torno de Rose, um torno geométrico



Mas transformar as informações de desenho de engenharia ou modelo CAD, para um sistema automatizado por cames, é um processo complexo e que requer a maquinação do mesmo o que representa um elevado tempo de preparação da maquinação. Em contraste, o controlo numérico permite que, usando abstrações como números e linguagens de programação, a informação seja transferida diretamente para a máquina. Isto iria aumentar a rapidez da elaboração de um “programa”, uma vez que não existiria a necessidade de o materializar.

Para tornar este processo uma possibilidade, era necessário desenvolver um mecanismo que fosse capaz de traduzir a informação num código representativo da trajetória que a máquina teria que realizar, assim como, também, as velocidades e outros parâmetros associados. Tais sistemas já existiam **nos finais do séc. XIX**, transformando informação abstrata numa linguagem que poderia ser interpretada por uma máquina. Exemplos destes dispositivos são a máquina de tear de Jacquard (Jacquard loom) (**figura 17a**), o piano automático ou pianola (**figura 17b**), e os computadores mecânicos.



a) Leitor de cartões da máquina de tear de Jacquard



b) Pianola a ler uma música escrita em código

**Figura 17 - Mecanismos programados com linguagem específica**

Mas, mesmo com a tecnologia já existente e disponível, só nos anos 1950s, após o final da 2ª Guerra Mundial, é que se deu a grande revolução na área da maquinação.

**Esta revolução é iniciada em 1947** por John Parsons, que, na sequência de um projeto de maquinação de uma hélice de um helicóptero, teve a ideia de utilizar cartões perfurados para controlar a posição de uma máquina que permitia a punção ponto a ponto e é por muitos considerado o início do controlo numérico.

Mas, como esta ideia estava fora da sua área de conforto, em **1949** Parsons, após ser contratado pelas Forças Aéreas Americanas, decidiu contactar o Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) para elaborar um sistema de feedback para controlar o posicionamento da máquina que tinha criado. Ao analisar a ideia de Parsons, os engenheiros do MIT concluíram que este sistema podia ser melhorado se, ao invés de furar ponto a ponto, fosse criado uma trajetória entre os pontos e a máquina fosse capaz de seguir a mesma num movimento de corte semelhante ao das fresadoras convencionais. Tal solução iria garantir melhor acabamento e diminuição dos pontos necessários para serem processados [5].

A potencialidade desta tecnologia era tanta, que o MIT decidiu continuar as pesquisas sem Parsons, e, em **1952**, apresentou a primeira fresadora vertical com três eixos controlada por um novo tipo de controlador, composto por um sistema híbrido analógico/digital que usava uma fita perfurada com sete vias que representava as variáveis e trajetórias do programa. Devido à sua complexidade e o preço envolvido, só apenas em **1955** é que esta tecnologia ficou pronta para ser utilizado na indústria.

Com o aparecimento dos primeiros computadores, a necessidade de juntar estas duas tecnologias torna-se o foco no desenvolvimento na área do CNC, e, em **1958**, foi apresentada a primeira aplicação de computador desenvolvida pelo MIT que auxiliava a geração de programas de comando numérico (antecessores do CAD/CAM), designado por *Automatically Programmed Tool* (APT).

Com a implementação destas novas tecnologias, em **1959**, a General Motors (GM) iniciou um projeto experimental para digitalizar, armazenar e imprimir os esboços dos projetos gerados nos vários departamentos da GM. Este projeto foi designado por *Design Augmented by Computer* (DAC) e tinha como objetivo a conversão direta de diagramas de papel em modelos 3D, em comandos APT, que seriam maquinados em



fresadoras. Este projeto levou que, **em 1963**, pela primeira um desenho passasse de esboço de papel 2D para protótipo de argila 3D [6] [7].

Esta tecnologia levou ao aparecimento dos primeiros sistemas CAD, e com eles os primeiros sistemas CAD/CAM/CNC por volta dos anos **1970s**, como iremos abordar em maior detalhe.

A evolução da tecnologia CNC, não ficou limitada às máquinas de maquinação, pelo contrário, abriu caminho para a pesquisa e desenvolvimento de outras áreas associadas à maquinação.

Este desenvolvimento é demonstrado no final dos anos **1960s**, o revestimento de ferramentas por deposição química de vapor, que possibilitou a criação de ferramentas mais resistentes e que garantam melhor acabamento. Este evento também levou à existência de um maior investimento no desenvolvimento na área das ferramentas para maquinação, dado a sua grande importância e mais-valias para o processo de maquinação CNC [7].

Além das tecnologias associadas às ferramentas de corte, existem outras tecnologias que nasceram a partir da CNC e que, ainda hoje, estão intimamente associadas. É o caso das máquinas de medição por coordenadas (CMM) e da electroerosão ou EDM (*Electrical Discharge machine*). Ambas as tecnologias utilizam as bases do controlo numérico (NC) que é o fundamento da tecnologia CNC, mas só que aplicam a outras áreas que não a maquinação por corte.

A tecnologia de electroerosão tem os seus princípios **no séc.XVII** com o físico Joseph Priestly, que se torna o primeiro homem a compreender o efeito corrosivo que descargas eléctricas exerciam em materiais metálicos. Mas só em 1947 é que dois cientistas e parentes russos descobriram um método de controlar a erosão induzida pelas descargas eléctricas recorrendo à submersão das peças metálicas num fluido dielétrico, o que ficou conhecido por EDM.

Após estas descobertas existiram muitas tentativas de aperfeiçoar a tecnologia e a sua aplicabilidade, e, **em 1967**, a primeira máquina de electroerosão é fabricada e comercializada na União Soviética. Só mais tarde, **em 1976**, é que a empresa americana Andrew Engineering aplicou o conceito do controlo numérico à electroerosão, criando assim a primeira electroerosora CNC [8] [9] [10].

Outra aplicação da tecnologia CNC, foi na área da metrologia, a qual permitiu um grande avanço nas **máquinas de medição por coordenadas (CMM)**.

A tecnologia CMM nasce da necessidade do controlo de peças com elevadas precisões, sendo que os equipamentos de medição da época apresentavam algumas limitações, exigida pela rápida evolução da indústria metalomecânica nos anos 1950, fruto do romper da tecnologia CNC. Por isto, o mundo da Metrologia também teve que acompanhar este desenvolvimento e evolução das tecnologias.

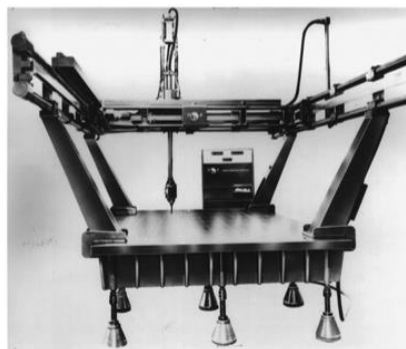
O primeiro ponto com valor de referência foi o desenvolvimento da máquina de medição universal, “Moore No. 3”, **em 1957**, que, embora não utilizasse posicionamento por coordenadas, tinha um funcionamento semelhante ao da fresadora convencional e permitia medições muito precisas e de geometrias complexas [11] [12].

Mas não foi preciso muito tempo para que a primeira máquina de CMM aparecesse, e, **em 1959**, a Ferranti introduz a primeira CMM (**figura 17a**). Esta máquina foi uma revolução, uma vez que já permitia o posicionamento automático no plano XoY e posterior medição no eixo Z.

A partir deste ponto surge um grande desenvolvimento das tecnologias de medição, e, **em 1965**, a equipa DEA (*Digital Electronic Automation*) liderada por Franco Sartorio é a primeira empresa a criar uma CMM automatizada do tipo Gantry ou Ponte (**figura 17b**), que é capaz de realizar medições ao longo de dos e eixo principais XYZ e é considerada a primeira CMM 3D.



a) Primeira CMM criada pela Ferranti



b) Protótipo da CMM com 3 eixos criada pela DEA

Figura 18 - As primeiras CMM

Na **primavera de 1963**, perante o grande desenvolvimento das tecnologias de medição de precisão, a AASME Board of Standards inaugura o B89 *Metrology Committee*, que reflete a importância e potencial da tecnologia CMM para a indústria [13].

Em **1965** a Checkmate CMM (Shelton) introduz um novo conceito revolucionário e essencial nas CMM atuais, os rolamentos de ar que desempenham um papel fundamental na precisão necessária nos equipamentos de metrologia, uma vez que não têm praticamente atrito e são altamente estáveis.

Embora cada vez mais as tecnologias de medição existentes se adaptassem às necessidades do mercado, havia ainda a necessidade de automatizar o sistema de medição e adapta-lo às novas tecnologias da época, designadamente o computador.

Com este objetivo em mente, em **1967**, a Sheffield Corp. contrata a Data Corporation para programar um “computador” capaz de interagir com a CMM. O resultado é chamado de EP PDP-8, em simples computador com 0.006 megabytes de memória e não tem capacidade armazenamento de dados. Este programa traz uma grande revolução ao mundo das CMM, uma vez que inventa os alinhamentos e a impressão automática dos resultados dimensionais obtidos [14].

Outra tecnologia associada às CMM, na qual ocorrem vários desenvolvimentos significativos são as ponteiras de toque utilizadas, e, em **1972**, a ponteira de toque (dynamic touch probe) é desenvolvida pelo senhor David McMurtry, fundador da Renishaw, que, hoje, é uma das maiores marcas neste mercado.

Uma nova evolução nesta área acontece após apenas um ano, em **1973**, com Carl Zeiss que inventa a primeira ponteira capaz de ler ao longo de 3 eixos e torna, assim, possível o varrimento contínuo com ponteira também conhecido por scan [15].

A primeira CMM totalmente automática é apresentada em **1973** pela DEA. Esta, também, já permite a troca automática entre ponteiras de toque, que hoje é incorporada em todas as CMM.

Mas só em **1980** é que a Mitutoyo apresenta a primeira CMM controlada diretamente por computador, que permite a inspeção direta do modelo com uso do CAD foi introduzido [11] [16].

Hoje, o mundo da metrologia dimensional é sinónimo de CMM devido à necessidade diária da utilização desta tecnologia para garantir o controlo dimensional com precisões elevadas.

Esta precisão é complementada pela sua versatilidade crescente, com o uso da CMM de 5 eixos e desenvolvimento das tecnologias de medição indiretas para auxílio da metrologia.

As tecnologias CMM tradicionais que usam ponteiras de toque, podem ser ainda combinadas com outras tecnologias de medição (sensores de luz laser, vídeo) e são conhecidas como medição multisensor, cuja utilização é já uma prática comum nos dias de hoje.

Claro que estas não foram as únicas tecnologias despertadas pelo desenvolvimento das tecnologias CNC, que teve não só impacto nas tecnologias semelhantes, mas também influenciou um aumento das tecnologias de automação, computadorização e armazenamento de dados.

Outras tecnologias intrínsecas à CNC são, por exemplo, a impressão a 3D ou o CAD/CAM que iremos abordar nos próximos capítulos.

### 3.1.2. Equipamentos CNC

O CNC presente nos nossos dias, nasce do culminar de três tecnologias (Máquina-ferramenta, Automação e Informática), e hoje, é conhecido pela sua elevada precisão, rapidez e versatilidade, possibilitando o fabrico de peças cada vez mais complexas e uma maior produtividade.

As principais vantagens e mais-valias do CNC são:

- **Aumento de produtividade das máquinas**- Através da diminuição do tempo total de maquinação e dos tempos não produtivos até 90%.
- **Flexibilidade** -Basta apenas trocar de programa para que a máquina fabrique outro produto.
- **Precisão** -As máquinas CNC beneficiam de um maior desenvolvimento tecnológico dos seus componentes e permitem realizar várias operações com o mesmo aperto da peça.
- **Redução de controlos intermédios** -É possível obter peças com dimensões mais constantes.
- **Segurança** -A existência de blindagens de resguardo e os vários mecanismos de segurança permitem maior segurança para o operador.

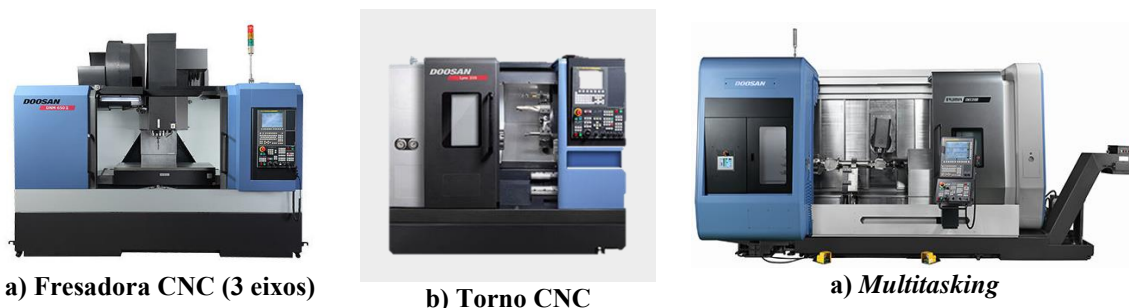
Hoje em dia constatamos um desenvolvimento enorme da tecnologia CNC que nos permite elevadas velocidades de corte e avanço (**Tabela 1**). Tal evolução, torna possível obter a maquinação da maioria dos

materiais disponíveis no mercado, assim como nos oferece tecnologias diversificadas que possibilitam qualquer operação imaginável.

**Tabela 1 - Valores atuais possíveis recorrendo a máquinas CNC [17]**

Tipo de Máquinas	Precisão	Velocidade de Rotação da Arvore Principal	Velocidade de Avanço
Fresadoras	Até 5 $\mu$ m (5x10 <sup>-6</sup> m)	Até 60.000 rpm	Até 90.000 mm/min
Tornos	Até 5 $\mu$ m (5x10 <sup>-6</sup> m)	Até 6.000 rpm	Até 60.000 mm/min
<i>Multitasking</i>	Até 5 $\mu$ m (5x10 <sup>-6</sup> m)	Até 6.000 rpm	Até 60.000 mm/min

Sabemos que as tecnologias se adaptam às necessidades da indústria e que cada uma delas tem uma função específica. Por um lado temos as fresadoras CNC (**Figura 19a**) que permitem a maquinação de qualquer tipo de geometria, que é ainda mais facilitado pela implementação da tecnologia de 5 eixos, dedicam-se maioritariamente à maquinação de peças prismáticas. Por sua vez os tornos CNC (**Figura 19b**) são utilizados para maquinar peças cilíndricas, uma vez que garantem melhor acabamento e tempos mais reduzido, quando em comparação com as fresadoras CNC. Finalmete o multitasking (**Figura 19c**) é uma tecnologia CNC mais recente que permite a fusão das vantagens associadas às duas tecnologias anteriores.



**Figura 19 - Tecnologias das Máquina-ferramenta CNC**

Além das tecnologias mencionadas acima, existem, ainda, muitas outras que representam o mundo do CNC e que serão seguidamente apresentadas com maior detalhe.

Uma das principais tecnologias CNC é a **fresadora CNC** que permitia inicialmente a maquinação segundo os 3 eixos XYZ, mas atualmente já são comuns fresadoras CNC que funcionam a com mais do que 3 eixos.

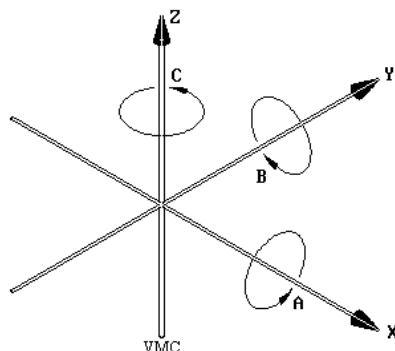
Estas tecnologias que permitem mais eixos, têm como base o referencial normal XYZ, só que, agora, considera-se também as rotações segundo esses 3 eixos como eixos auxiliares ABC, respetivamente. Estes eixos auxiliares vão ter a função de reorientar o referencial através de rotações e, consequentemente, também a peça que está a ser maquinada (**figura 20**).

Uma máquina de 4 eixos apresenta os 3 eixos de maquinação comuns e um eixo de rotação adicional que permite o reposicionamento da peça, possibilitando, assim, a maquinação num novo plano ou superfície da mesma.

De uma maneira semelhante, as máquinas de 5 eixos são constituídas pelos eixos XYZ, pelo eixo C que representa a rotação em torno do eixo Z e pelo eixo A ou B dependendo se queremos permitir uma rotação em torno do eixo X ou em torno de eixo Y, respetivamente.

Já, as máquinas de 4 eixos são geralmente do tipo A ou B, uma vez que permitem a rotação segundo o eixo X ou Y, uma vez que a rotação segundo Z era redundante, e as máquinas de 5 eixos podem ser (geralmente) do tipo AC ou BC.

A utilização dos 6 eixos em simultâneo não é necessária, uma vez que com uma combinação de rotações de A+C ou B+C se conseguem atingir quaisquer configurações de A+B+C, ou seja, a utilização do sexto eixo é redundante para a maquinação.



**Figura 20 - Eixos de Translação e Rotação**

Na maquinação a **4 eixos** (figura 21 a), o eixo de rotação é, geralmente, utilizado para mudar o plano de uma peça a ser maquinada, ou para maquinar várias peças, caso estejamos a utilizar um suporte prismático que permita o aperto de peças nas várias faces, mas todas na mesma configuração, e com a rotação do quarto eixo permite realizar a mesma operação de maquinação, mas para peças diferentes.

A maquinação a 5 eixos apresenta algumas vantagens adicionais e, por isso, é utilizada em situações diferentes. É importante, em primeiro lugar, dividir a tecnologia de 5 eixos em duas categorias: 5 eixos não contínuos e 5 eixos contínuos.

**Os 5 eixos não contínuos** (figura 21 b) são um pouco mais semelhantes às tecnologias de 3 e 4 eixos, mas agora permitem a maquinação da peça em, virtualmente, qualquer plano (com exceção do plano de fixação da peça por razões óbvias). Depois de posicionar o “prato” ou base num dado ângulo através de rotações em AC ou BC, a posição do prato é fixa e então permite à CNC maquinar em XYZ.

Também permite a troca do plano de maquinação num espaço de tempo muito mais curto, se comparado com os 3 eixos, e também a maquinação de planos inclinados sem ter que recorrer a dispositivos de aperto e fixação especiais ou cálculos adicionais, sem ter que desapertar a peça.

A **tecnologia de 5 eixos contínuos** (figura 21 c) tem um funcionamento parecido à anterior, só que em vez de existirem 2 passos distintos – Posicionamento em AC ou BC e posterior maquinação em XYZ – Todos os 5 eixos são independentes o que permite a maquinação de geometrias complexas com elevada precisão, qualidade de acabamento e rapidez, uma vez que antes estas eram maquinadas por aproximação num plano com um incremento em Z muito pequeno para simular uma superfície lisa ou eram mesmo impossíveis de maquinar.

Embora esta tecnologia traga imensas vantagens, também acarreta uma grande desvantagem: a dificuldade de programação. Isto deve-se ao facto de ser uma tecnologia relativamente nova e os softwares ainda se estarem a adaptar e a simplificar os procedimentos de programação.

Por isto, este tipo de maquinação é essencialmente utilizado em maquinação de séries (uma vez que o tempo de programação é muito elevado, mas depois a nível de tempo de maquinação pode traduzir em rendimento) ou em peças que as geometrias não sejam possíveis de serem realizadas de outra forma.



**a) Máquina com 4 eixos tipo A**



**b) Máquina com 5 eixos não contínuos**



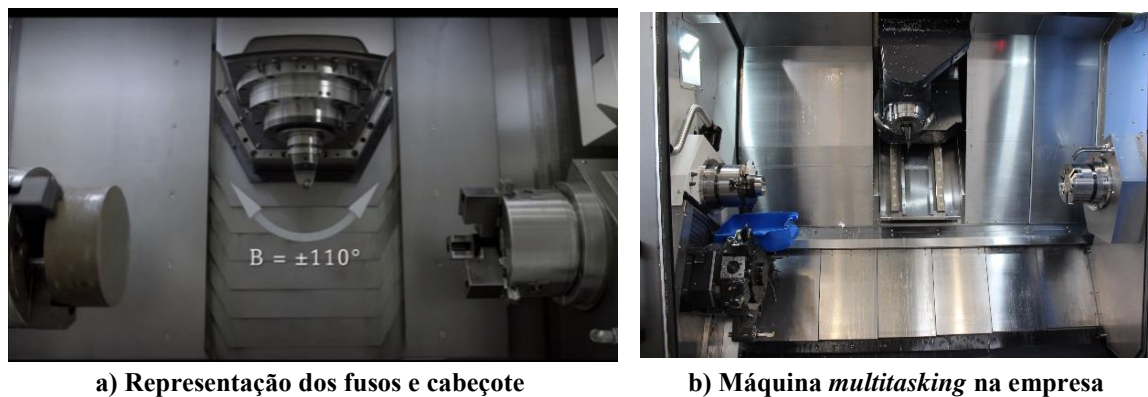
**c) Máquina com 5 eixos contínuos**

**Figura 21 - Tecnologias de fresagem CNC**

Outra tecnologia já mencionada, com a qual se teve algum contacto durante o estágio, foi a **Multitasking**, que consiste na adição de um cabeçote de maquinagem semelhante ao presente nas fresadoras CNC aos centros de torneamento. Esta adição não influencia a capacidade de maquinagem normal dos tornos e possibilita agora a fresagem de características prismáticas nas peças de torno nos mais diversos planos, possibilitando assim praticamente todo o tipo de operações de maquinagem existentes.

Um sistema *multitasking* é normalmente composto por um fuso fixo à esquerda, um fuso móvel à direita, por uma cabeça móvel com 4 eixos (XYZ+B) e ainda uma torreta de torno (**figura 22**).

Como ambos os fusos podem funcionar tanto em rotação contínua (operações de torneamento) como também permitem a rotação para uma posição fixa para a fresagem, esta última funcionalidade pode trabalhar analogamente ao quinto eixo de fresagem [18].



**Figura 22 - Interior de uma máquina multitasking**

A cabeça móvel pode tanto ser equipada com ferramenta de torneamento e ser indexada numa posição fixa ou com ferramentas de fresagem e ter rotação contínua.

O fuso móvel pode-se mover ao longo do eixo X para agarrar a peça no fuso fixo, depois de terminada a maquinagem naquele aperto, de modo a realizar operações na face que não foi maquinada devido ao aperto anterior, evitando assim a necessidade de um segundo aperto manual pelo operador e diminuindo os tempos não uteis de maquinagem.

Outra característica que acrescenta um grande valor a esta tecnologia é a possibilidade de programar a maquinagem de duas peças diferentes em simultâneo, uma vez que permite maquinar uma peça no fuso fixo com o cabeçote móvel e outra no fuso móvel com a torreta, embora o uso da torreta só permite as operações de torno.

Mais uma vez, como é uma tecnologia em desenvolvimento, a sua programação exige muito tempo e cuidados adicionais, o que limita o seu uso na indústria para além dos custos envolvidos na aquisição do equipamento, mas os resultados que permitem a maquinagem de peças de geometrias complexas com a utilização de uma única máquina (**figura 23**).



**Figura 23 - Figura 23 Exemplo de uma peça maquinada numa multitasking**



Uma outra tecnologia com algumas semelhanças aos eixos múltiplos é a **troca automática de paletes (APC) (figura 24)**, também chamada de troca de mesa de trabalho, que, embora seja uma tecnologia já algo antiga, permite automatizar a alimentação da máquina com novas peças sem intervenção dos operadores e assim diminuir os tempos não produtivos de maquinação.

Isto permite automatizar linhas de produção, ou mesmo otimizar a produção individual da máquina, uma vez que permite ao operador fazer a preparação da próxima peça enquanto a peça atual está a ser maquinada.

Para este sistema ser funcional é importante ter atenção na escolha do sistema de aperto, recorrendo a sistemas de fixação ponto-zero, gabaris ou outros sistemas semelhantes que permitam uma troca automática da peça sem pôr em risco a diminuição da precisão da maquinação.

Devido a estas especificidades, este sistema torna-se muito aplicado em células automatizadas de produções de grandes séries de peças.



**Figura 24 - Máquina CNC com troca de paletes incorporada**

A fabricação de grandes séries de peças recorrendo à maquinação CNC leva à aplicação de tecnologias e processos de automatização, gestão industrial e maquinação de uma forma colaborativa, e onde a sistematização, repetibilidade e controlo do processo são de grande importância.

Um dos sistemas disponíveis para aplicar no fabrico de tanto de médias e grandes séries são os **Sistemas de Manufatura Flexíveis (FMS)**, que são sistemas de produção altamente automatizados, capacitados a produzir uma grande variedade de diferentes peças e produtos (**figura 25**), usando o mesmo equipamento e o mesmo sistema de controlo. Em geral os FMS são compostos por um sistema de Armazenamento e Processamento de Material composto por equipamentos automatizados ou robotizados que fornecem e gerenciam material que disponibilizam o material correcto às máquinas CNC que formam o Sistema de Processamento ou de Fabrico. Este Sistema tem a função de maquinar as peças que serão verificadas pelo Sistema de Controle Computarizado que realiza o controlo operacional do conjunto.

O FMS tem como objectivo melhorar a utilização e produção das máquinas e impulsionar a produtividade, eliminando tempos improdutivos e otimizando a produção das peças. Este aumento na produtividade é principalmente visível para instalações que produzam grandes séries de peças e diversificadas, uma vez que o FMS permite a adaptação do sistema de produção de forma automatizada, de acordo com as necessidades da empresa. Em vez de ter um conjunto de máquinas dedicadas à produção de uma peça, obtém-se um sistema de produção automatizado fechado (preparação/produção/controlo) que garante que todas as CNCs estão em contínuo funcionamento, evitando os tempos improdutivos [19].

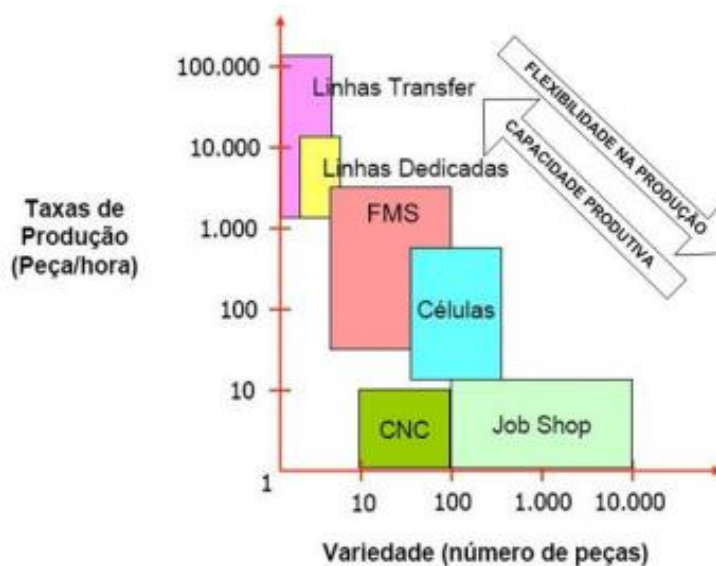


Figura 25 - Gráfico Flexibilidade vs Produtividade do FMS

### 3.1.3. Sistemas de aperto, fixação e calibração

Os sistemas de aperto e fixação são um dos principais componentes que afeta a qualidade da maquinação CNC. Isto deve-se à preponderância da mão humana na utilização dos mesmos, que significa um aumento significativo na possibilidade de erros associados.

O sistema mais comum utilizado nas fresadoras CNC é a **prensa**, que pode ser mecânica, pneumática ou hidráulica.

A **prensa mecânica (figura 26a)** é o sistema de aperto mais utilizado, uma vez que tem baixo custo, é muito versátil e garante um aperto eficaz. A **prensa pneumática** apresenta um custo mais elevado, mas garante um aperto “automático” com um grande curso que garante uma boa repetibilidade e pode utilizar-se o ar comprimido que já existe na CNC para o seu acionamento. Em contrapartida, a **prensa hidráulica** apresenta um curso pequeno que tem que ser mecanicamente adaptado para as diferentes situações e tem custos muito elevados, mas, de todas as prensas, são as que garantem o aperto forte e estável que pode atingir até +/-5 toneladas, além de apresentar uma repetibilidade elevada, o que as torna ideais para a sua utilização na produção de séries e linhas automatizadas.

Na preparação prévia da prensa hidráulica devemos ter em conta a pressão a exercer, uma vez que é um fator fundamental para garantir que a peça não é deformada ou riscada por excesso de pressão, ou para que a peça não saia do sítio no caso de pressão em falta.

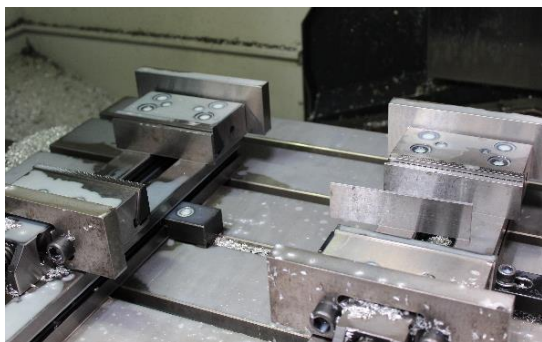
Outra solução económica e versátil são os **grampos** que garantem o aperto da peça por batimento e atrito, através do aperto de vários grampos na mesa da CNC de maneira que a peça seja apertada entre eles e a mesa.

Os grampos podem ir de simples peças em metal que são apertados por parafusos, a de grampos mais complexos que já têm sistemas de molas ou mesmo sistemas pneumáticos e hidráulicos (**figura 26b**).

É um sistema muito usado para apertar peças de grandes dimensões, uma vez que as soluções “standard” não comportam as mesmas.

As **buchas** são sistemas de fixação designados para garantir apertos de peças ou geometrias cilíndricas e têm uma aplicação muito forte nos tornos (**figura 26d**), mas também têm a sua aplicabilidade nas fresadoras (**figura 26c**).

São compostas de pelo menos 3 grampos (para garantir o aperto da peça em 3 pontos para garantir que não desliza) e são, geralmente, ativadas hidraulicamente. As buchas com mais que 3 pontos de contacto são geralmente utilizados nos tornos, para realizar geometrias excêntricas uma vez que os grampos são individualmente reguláveis.



a) Prensa mecânica



b) Sistemas de grampos pneumáticos



c) Bucha para fresa com 4 pontos de apoio



d) Bucha de 3 pontos incorporada num torno

**Figura 26 - Sistemas convencionais de fixação**

Estas tecnologias são muito utilizadas e têm uma aplicabilidade muito vasta, mas não oferecem bons resultados quando se precisa de maquinar peças de grandes dimensões e garantir as precisões pretendidas. Por isso foi necessário o desenvolvimento de novas tecnologias.

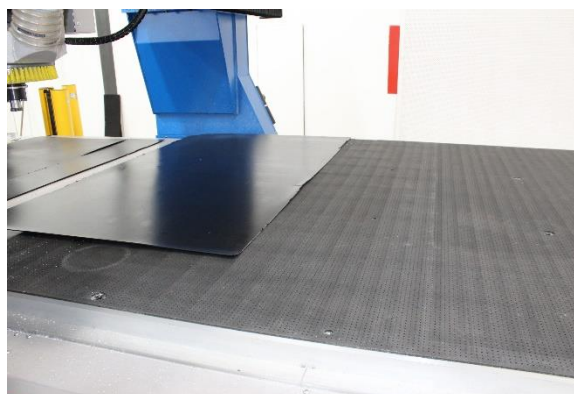
A tecnologia de **fixação por vácuo (figura 27a)** é uma das principais tecnologias focadas na maquinação de peças de grandes dimensões, garantindo resultados excelentes, principalmente para baixas espessuras. Consiste em criar um espaço de entre a peça e a mesa que vai succionar a parte inferior da peça, criando assim vácuo entre as faces.

A grande desvantagem é que não é possível maquinar abaixo da face inferior, uma vez que iria estragar a mesa de vácuo. Por este motivo, este sistema pode ser complementado com um tapete de borracha que é colocado entre a mesa e a peça. Assim, garante a sucção e permite a maquinação da peça na totalidade (até 2mm abaixo da face inferior). A maior parte das mesas de vácuo também permite a colocação de pinos, que servem para posicionar a peça e evitar deslizamentos no plano da mesa, sendo que o vácuo garante o aperto no eixo perpendicular à mesa [20].

Embora a tecnologia de vácuo apresente bons resultados para fixar chapas de pouca espessura, para a fixação de peças de maior dimensão e com espessuras consideráveis é necessário recorrer a um outro sistema de aperto. A resposta a esta necessidade foi a tecnologia de **aperto magnético (figura 27b)**, muito utilizada em peças de grande dimensão, uma vez que garante o aperto de uma vasta gama de peças sem recorrer a outro tipo de tecnologias [21].

Embora seja uma tecnologia muito dispendiosa, torna-se necessária, dado que as soluções tradicionais se tornam crescentemente mais ineficazes com o aumento da dimensão das peças. O sistema de fixação magnética é constituído por uma placa magnetizável ou mesmo com imanes permanentes, que é ligada a um transformador. Uma vez ligada, esta placa comporta-se como um íman com muita atração e permite a fixação de qualquer componente metálico ferromagnético sem recorrer a outros sistemas de aperto.





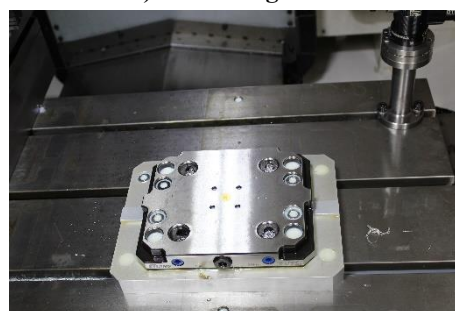
a) Mesa de vácuo



b) Mesa Magnética



c) Sistema de ponto-zero



d) Dispositivo de ponto-zero aplicado numa máquina

Figura 27 - Sistemas de aperto com aplicações específicas

Um outro sistema mais recente em desenvolvimento é o **sistema de ponto-zero (figura 27c)**, este consiste na utilização de um sistema móvel que contém 4 pernos que servem para posicionar de forma exata numa base que contém cavidades para esses pernos. Nessa cavidade está incorporado um sistema de aperto que fixa os pernos e, consequentemente, o sistema móvel onde a peça deverá estar fixa. Isto permite ao operador a preparação do Setup de maquinação durante a maquinação de outra peça. Assim conseguimos otimizar fixação e a troca de peças, reduzindo o tempo de configuração na máquina, uma vez que o sistema permite o posicionamento e aperto num único passo e garante uma alta repetibilidade do processo. Outra grande vantagem é a sua interface standard que está adaptada para todo o tipo de máquina (**figura 27d**), o que garante uma grande versatilidade de aplicações [22].

Além da necessidade de garantir um bom aperto e fixação da peça a maquinação na máquina CNC, também é necessário a posicionar e localizar na máquina.

No princípio a peça era localizada através do toque de uma ferramenta de corte na peça, mas, devido à importância desta etapa no produto final na maquinação, este processo logo foi desenvolvido até ao uso de ponteiras de apalpação nos dias de hoje

Um dos primeiros dispositivos que permitiu a localização rigorosa e precisa da peça foi o **centrador excêntrico (figura 28a)**, que permitia referenciar com precisão as superfícies laterais de uma peça sem causar marcas ou riscos na peça. Este sistema é ainda utilizado na indústria atual e consiste num mecanismo com duas peças unidas por uma mola, que, ao serem submetidas a uma rotação, não são concêntricas e, por isso, o nome de centrador excêntrico. O processo de posicionamento é realizado ao levar a parte inferior do mecanismo a tocar na peça lateralmente e aproximá-la até que ambos os componentes do sistema comecem a rodar concêntricamente. Tal acontece porque o sistema está calibrado de forma a que, quando o centro do eixo de rotação na CNC estiver a uma distância que corresponde ao raio do mecanismo, as duas partes do mecanismo comecem a rodar concêntricamente.

Este tipo de posicionamento serve para referenciar a peça lateralmente, e é complementado, normalmente, pelo uso de uma ferramenta padrão para o posicionamento da origem em Z. Este processo de posicionamento em Z é muito semelhante ao utilizado na calibração de uma nova ferramenta.

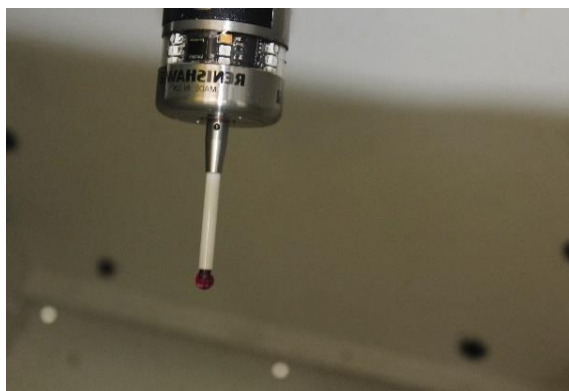
Outra solução mais recente para a realização do posicionamento de uma peça na máquina CNC é a **ponteira de apalpação (figura 28b)**, que traz maior precisão, rapidez e automatização ao este processo.

Funciona de uma forma análoga às ponteiros utilizadas nas CMM, embora, normalmente, sejam mais robustas, uma vez que estão incorporadas na própria CNC. Garante uma elevada precisão devido a necessidade de apenas um toque sem realizar esforços adicionais, rapidez, uma vez que é só necessário um toque para localizar a peça, e automação, que permite a programação do posicionamento numa série para garantir uma maquinação mais precisa e o alinhamento da peça segundo referenciais inclinados.

Também permite a medição da peça maquinada na própria CNC, apesar de apresentar precisões inferiores à CMM.



a) Centrador excêntrico



b) Ponteira de apalpação ou apalpador

**Figura 28 - Tecnologias para referenciar uma peça CNC**

Para garantir uma boa maquinação, não basta somente um bom aperto e bom posicionamento da peça. Também é fundamental que as ferramentas que vão ser utilizadas estejam em bom estado, devidamente calibradas e com as características detalhadas na máquina CNC.

Portanto, é de suma importância a calibração de uma ferramenta sempre que colocada no armazém de ferramentas de uma CNC.

Esta calibração pode ser efetuada de várias formas e o sistema, utilizando um **calibre de referência e um pré-setter** (medidor vertical), é um dos métodos mais comuns de calibração das ferramentas para uso na fresadora CNC (**figura 29a**).

O primeiro passo neste tipo de calibração é levar o calibre de referência ao pré-setter até atingir um valor definido. Este valor segundo o eixo Z (global da máquina) deve ser guardado na máquina como o “Z” zero de referência. Posteriormente, devemos repetir o passo anterior com a nova ferramenta equipada até atingir o mesmo valor no pré-setter, que irá corresponder em Z ao zero da ferramenta. Para concluir a calibração, a CNC irá calcular a diferença real entre o zero de referência do calibre e o zero da ferramenta, para determinar qual a distância real da nova ao o ponto “Z” zero de global da máquina que corresponde à base do cabeçote, e assim a nossa ferramenta fica calibrada na sua altura.

Como o sistema anterior está sujeito a erros do operador e é um processo moroso, foi desenvolvido outro método para a calibração das ferramentas que efetua a calibração tanto nas fresadoras (**figura 29b**) como nos tornos CNC (**figura 29c**), com o uso de uma **sonda de toque ou calibrador**.

Com este método apenas precisamos medir o comprimento ou o diâmetro aproximado da nova ferramenta, e correr o programa de calibração para a altura ou raio da ferramenta. Com essas medidas a máquina vai aproximar o cabeçote compensando de acordo com a nossa medição e aproximando de uma sonda de toque ou calibrador que está incorporado na máquina numa posição fixa até ao toque, que permite obter, respetivamente, o comprimento ou diâmetro exato da ferramenta.

Com o desenvolvimento das tecnologias CNC, também nesta área se procura a melhoria continua das tecnologias e resultados obtidos. Esta constante procura culminou na aplicação da tecnologia laser na calibração das ferramentas de corte para maquinação CNC.

A medição das ferramentas por com a utilização de um sistema de visão ou sistema de laser já era possível recorrendo a máquinas externas à CNC, quem têm capacidade de medir ferramentas com grande precisão. Estas máquinas são conhecidas por **Pré-Set (figura 29e)**, uma vez que permitem a medição “pré-maquinação” do conjunto ferramenta-cone utilizado e consequente atualização manual dos dados da ferramenta na própria máquina, ficando assim a calibração efetuada. Estes sistemas também eram utilizados para verificar o estado da ferramenta (desgaste da ponta).

Mas a grande inovação foi a inclusão da **tecnologia laser** nas CNC (**figura 29d**) para a calibração das ferramentas, uma vez que garante uma calibração muito precisa e incrivelmente rápida. Esta consiste na emissão de um feixe laser, que vai ser interrompido pela nova ferramenta. Em primeiro lugar, a CNC movimenta a cabeça com a ferramenta ao longo de Z e, quando o feixe deixar de ser interrompido, então, será porque já percorreu todo o comprimento/altura e esse ponto corresponde à altura da ferramenta. Em seguida, repete o procedimento para encontrar o raio da ferramenta. No final do procedimento de calibração, temos a ferramenta totalmente identificada e definida na máquina e pronta a ser utilizada.

A utilização de **lubrificante** para auxílio do corte, é outro conceito essencial para a maquinação uma vez que a lubrificação permite obter melhores resultados na maquinação e diminuição do desgaste das ferramentas. A lubrificação pode ser realizada de duas formas distintas: externa, por jato direcionado, ou interna, utilizando os canais internos existentes em algumas ferramentas.

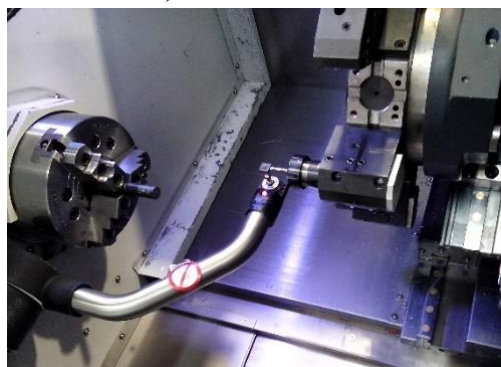
Neste ponto, abordamos a tecnologia de **quantidade mínima de lubrificação (MQL)**, que consiste na a lubrificação realizada por um aerossol entre a ferramenta e a peça, onde as gotículas de óleo de lubrificação são dispersas num fluxo de ar que forma uma película ou camada de lubrificante na zona de corte. Assim, permite aumentar a vida útil das ferramentas, melhor qualidade superficial, aumento da taxa de evacuação da aparas e a redução dos custos em lubrificantes/refrigerantes, para além de ser um processo ecológico [23].



a) Calibre Padrão



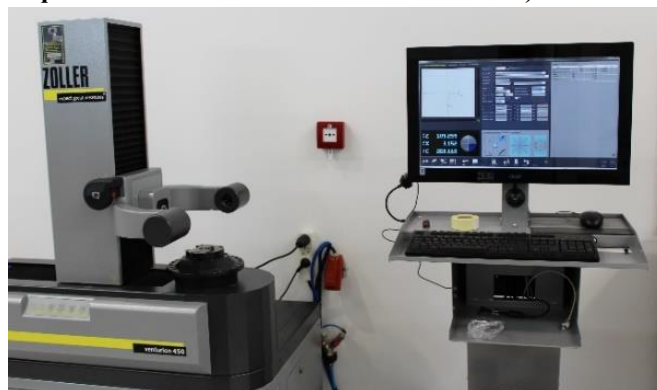
b) Sonda de toque numa fresadora



c) Sonda de toque num torno



d) Calibrador laser



e) Máquina de Pré-Set

Figura 29 - Tecnologias de calibração de ferramenta



### 3.1.4. Ferramentas de corte

As ferramentas de corte são uma parte extremamente importante para a maquinação CNC. São elas que permitem a maquinação e influenciam os resultados finais do acabamento das peças.

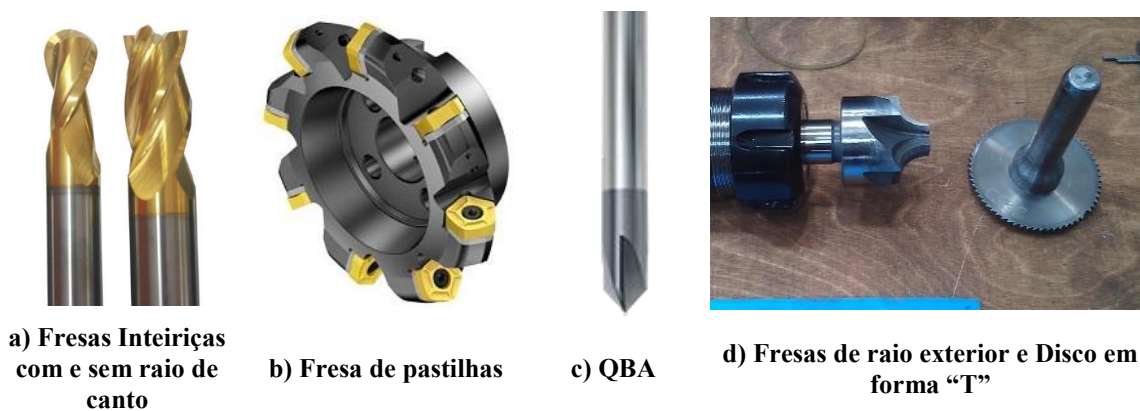
Embora não sejam exclusivas à maquinação CNC, o desenvolvimento das mesmas foi grandemente influenciado pela evolução do CNC e pelos desafios que ao longo dos anos foram apresentados.

Neste subcapítulo, vamos abordar, um pouco, quais as principais ferramentas de corte aplicadas nas tecnologias CNC e outras tecnologias associadas.

As principais ferramentas utilizadas na maquinação CNC são muito diversificadas, podendo dividir-se em duas grandes áreas: as ferramentas de trono e as ferramentas de fresadora, embora existam ferramentas comuns.

**Para as fresadoras**, as principais ferramentas utilizadas são, como o nome indica, as **fresas**. As fresas são o tipo de ferramenta mais versátil, que podem servir para operações tanto de desbaste como de acabamento; podem maquinar tanto na face de topo como na face lateral, dependendo do tipo de fresa. Podemos ainda dividir as fresas em dois tipos: as **fresas inteiriças** e as **fresas de pastilhas**. As fresas inteiriças normalmente apresentam diâmetros mais pequenos devido aos custos envolvidos no fabrico das mesmas e podem apresentar um raio de canto que podem ser úteis em algumas operações (**figura 30a**). As fresas de pastilha são uma solução para a criação de fresas com diâmetros maiores sem o aumento exponencial do preço de fabrico. São maioritariamente utilizadas para operações de facejamento ou para debastes pesados. Como podemos trocar as pastilhas quando apresentam desgaste ou para realizar um tipo diferente de operação ou acabamento, proporcionam a este tipo de ferramenta uma boa versatilidade, preços competitivos. tempo de vida longo (exceto das pastilhas) e bons acabamentos (**figura 30b**).

Ainda inserido no grupo das fresas existem mais três ferramentas que merecem ser referidas: o **QBA ou Quebra Arestas** é um tipo de fresa com raio de inclinação elevado, que é utilizado para operações muito específicas como pontear furos, quebrar arestas ou escarear furos (**figura 30c**); Os **discos em T** são uma ferramenta muito importante para maquinar rasgos que não poderiam ser maquinados de outra forma; As **fresas de raio exterior** ajudam na maquinação de raios exteriores, garantindo melhor acabamento e tempos de maquinação mais rápidos (**figura 30d**).



**Figura 30 - Ferramentas para fresadora CNC**

A ferramentas mencionadas são utilizadas maioritariamente nas fresadoras CNC, mas podem ser aplicadas também nos tornos, em ocasiões mais específicas, com exceção do QBA.

Outra família de ferramentas que podemos considerar são as ferramentas para operações de furação, que são comuns tanto à fresadora como ao torno CNC.

Neste tipo de ferramentas, a mais óbvia é a **broca** que é utilizada para realizar operações de furação e furação profunda (**figura 31a**). Estes furos podem ser retificados com um **mandril ou alargador** (**figura 31b**), no caso furos com tolerâncias apertadas ou podem ser roscados com auxílio de um **macho para roscar** (**figura 31c**) para roscas mais pequenas, ou com um **buril** (**figura 31d**), no caso de furos com diâmetros maiores ou para realizar roscas exteriores.



Figura 31 - Ferramentas para operações de furação e roscagem

Também existem ferramentas específicas **para operações de torneamento (figura 32)**. Neste caso, temos **ferros para desbaste ou acabamento**, que apresentam formas muito diversas e também usam de pastilhas para obter diferentes resultados. Uma ferramenta mais específica e exclusiva do torno são **ferros para sangrar** que servem para dividir a peça torneada do bruto da maquinação.

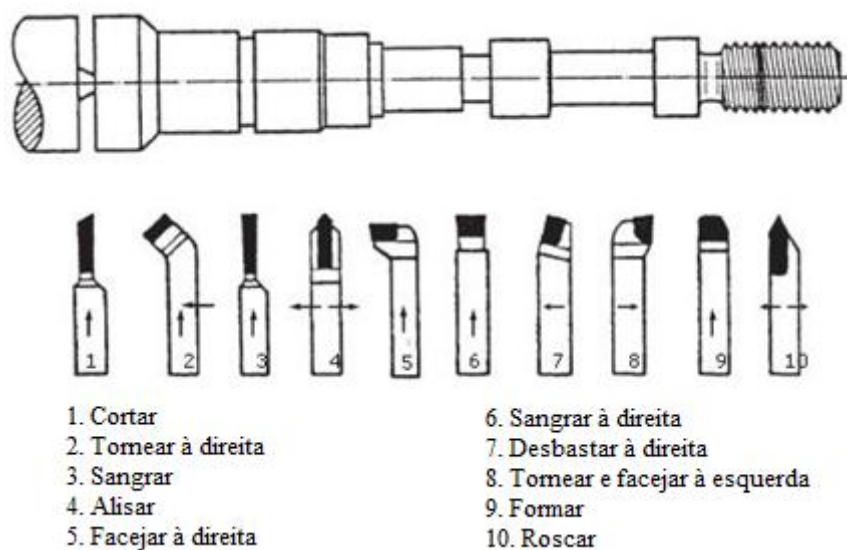


Figura 32 - Tipos de ferramentas para operações de torneamento

**Hoje**, as ferramentas são fabricadas a partir de uma gama muito diversificada de **materiais**, o que permite várias aplicações. O desenvolvimento das ferramentas de corte, designadamente na área dos materiais utilizados, possibilita hoje operações de maquinação em cerca de 1% do tempo que era necessário no início do Séc. XX.

As ferramentas também podem ser divididas, tendo em conta o tipo de material que as constituem. Temos, assim, ferramentas de aço rápido (HSS), carbonetos sinterizados ou metal duro (C), cermet (CT), cerâmica (CC), nitreto de boro cúbico (CBN) e de diamante policristalino (PCD).

As características das ferramentas dependem muito das características associadas ao tipo de material de que é feita. Dessas características as duas mais fundamentais são **a dureza e a tenacidade (figura 33)**.

**A dureza** pode ser descrita como a resistência que um material tem ao desgaste e à sua deformação mediante mudanças de temperatura. **A tenacidade** é basicamente a resistência à rotura ou quebra.

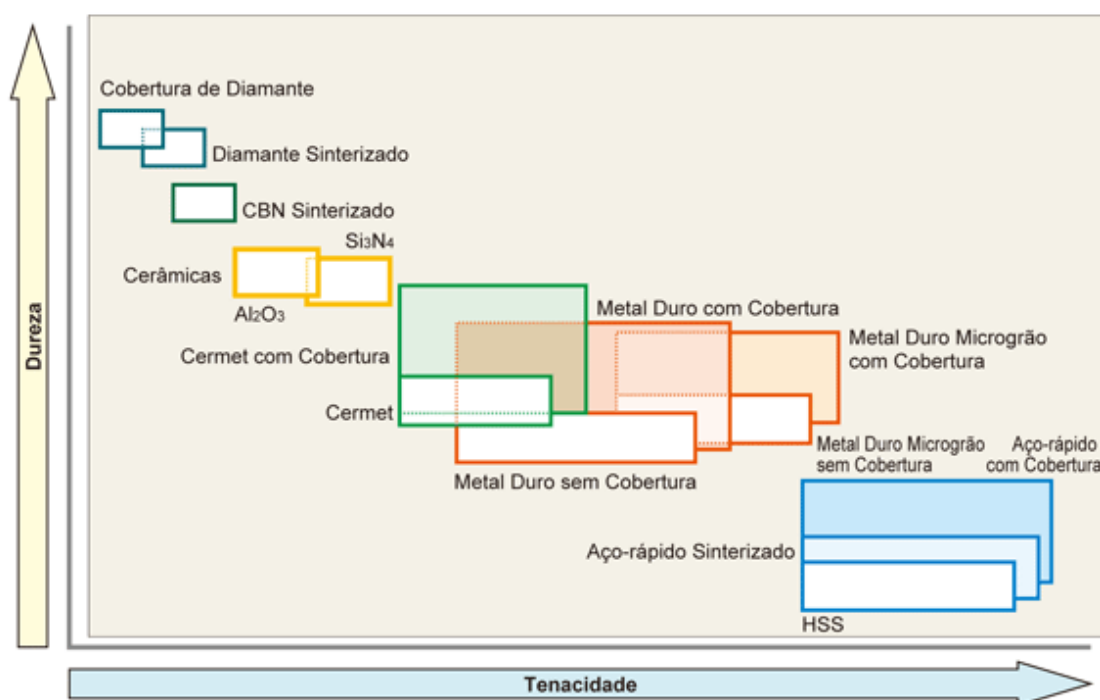


Figura 33 - Gráfico comparativo das propriedades dos materiais de cada tipo de ferramentas [24]

Com o aumento da dureza, os custos também aumentam, sendo que as ferramentas cerâmicas e de diamante são utilizadas para soluções mais específicas. As ferramentas de maior tenacidade são normalmente utilizadas para operações de desbaste, uma vez que são mais resistentes às flexões induzidas, embora essas mesmas flexões impliquem uma diminuição da qualidade de acabamento.

Podemos notar, pela **figura 33**, que algumas das características dos materiais são contraditórias e, por essa razão, é impossível criar uma ferramenta que concilie todas estas propriedades. É importante ter este fator de compromisso em consideração e tentar escolher o tipo de ferramenta com as características que melhor se adequam à operação em causa (**tabela 2**). Este aspeto no compromisso das características e propriedades que a ferramenta oferece leva a que o consumo de ferramentas de aço rápido já tenha sido ultrapassado pelo de carbonetos sinterizados, embora estas últimas sejam mais caras.

Uma outra maneira de tentar melhorar as características das ferramentas é a aplicação de uma **camada de revestimento** de dureza elevada e aplicá-la a um material com uma boa tenacidade. Assim, podemos atingir melhores resultados uma vez que o corpo da ferramenta apresenta uma boa tenacidade e a sua superfície uma boa dureza e melhor resistência ao desgaste a que é sujeita [25].

Para uma ferramenta poder maquinar, precisa de ter movimento de rotação e este só é possível quando a ferramenta está devidamente acoplada à fresadora CNC.

Este acoplamento é garantido em duas fases por um sistema de **porta-ferramentas**: o acoplamento à máquina e o acoplamento à ferramenta.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais para ferramentas [26]

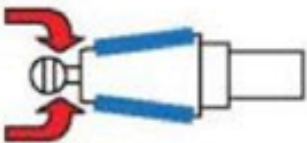
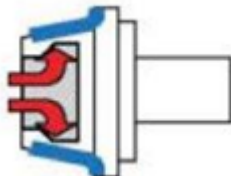
Material	Dureza (HV 10/30)	Tensão Rotura Transversal (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Coefficiente Dilatação Térmica (x10-6)	Condutibilidade Térmica W/m.K
Aço rápido	700 - 900	2500 - 4000	2,6 - 3	9 - 12	15 - 48
Carbonetos	1200 - 1800	1300 - 3200	4,7 - 6,5	4,6 - 7,5	20 - 80
Cermet (Si3N4)	1350 - 1600	600 - 900	2,8 - 3,2	3 - 3,3	20 - 35
Cermet (Al2O3)	1450 - 2100	400 - 800	3 - 4,5	5,5 - 8	10 - 38
CBN	3500 - 4000	500 - 800	6,8	4,9	100
PCD	5000 - 6000	600 - 1100	8,4	1,5	550

O **porta-ferramentas** é também chamado **de Cone**, uma vez que possui um formato cónico na sua zona de acoplamento com a máquina, de forma a facilitar o seu posicionamento. Esta fixação à árvore da máquina pode ser realizada por dois tipos de tecnologia.

A tecnologia de cone íngreme é a mais antiga e mais utilizada no meio industrial, mas, com a constante evolução da tecnologia CNC, não garante bons resultados para maquinação de altas velocidades, uma vez que o aperto na máquina é limitado a um aperto numa esfera.

O cone de copo vazio é uma nova tecnologia desenvolvida especificamente para altas velocidades e rotação e, além de garantir um melhor aperto comparativamente aos cones íngremes, apresenta ainda melhores resultados no posicionamento (**Tabela 3**).

**Tabela 3 - Principais características dos sistemas de fixação na árvore [27]**

Cone íngreme (ISO, BT, CAT)	Cone copo vazio (HSK)
Pouco rígido Fracas Precisão axial Pouco adequado para altas velocidade Pesado e com curso grande Produto Standard Já estabelecido no meio industrial	Excelente rigidez estática e dinâmica Excelente precisão axial e radial Adequado para altas velocidades Mais leve e com curso pequeno Produto recente (máquinas antigas não estão adaptadas) Utilizado em máquinas recentes e alta velocidade
	

Por outro lado, existem várias tecnologias disponíveis para o aperto da ferramenta de corte ao porta-ferramentas (**figura 34**) e foram adaptadas ao longo dos anos às necessidades e problemas existentes.

O aperto pode ser efetuado por um **sistema de Bucha** que tem um funcionamento semelhante aos sistemas existentes nos berbequins (**figura 35a**). É geralmente utilizado para a fixação de brocas ou mandris, mas também pode ser usada para fixar uma fresa. Embora não garantam um aperto muito forte, são interessantes devido à rapidez de troca de ferramenta.

Para operações que demandem maior rigor e esforço, pode-se recorrer a um **sistema de Pinças**, que têm um comportamento e aplicação semelhante ao sistema de bucha, mas apresentam um curso mais limitado e garantem um aperto mais estável, uma vez que a área de contacto é maior (**figura 35b**).



**Figura 34 - Tecnologias de porta-ferramenta**

O **sistema de aperto por Rosca** é principalmente utilizado para a fixação rápida de fresas de pastilhas, em que se rosca o corpo do suporte das fresas diretamente ao cone.

Os **sistemas de Aperto térmico ou de Aperto por Indução** são um dos mais utilizados para a fixação de fresas inteiriças, que vão estar submetida das a elevados esforços de corte. O processo consiste em dilatar o metal numa máquina específica (**figura 35c**), que submete o cone a temperaturas elevadas e, após a troca da ferramenta, submete-o a um arrefecimento rápido que faz com que o metal do cone contraia e garanta um aperto muito estável.

As grandes desvantagens são os custos de aquisição e o tempo de vida limitado do cone devido ao desgaste a que o material é submetido nas constantes operações de dilatação e contração.



a) Sistema de bucha



b) Várias pinças com diferentes diâmetros



c) Máquina para troca de ferramenta num porta-ferramenta por indução

Figura 35 - Exemplo de tecnologias de porta-ferramenta na empresa

Após a ferramenta estar colocada na máquina no respetivo Cone e devidamente calibrada será guardada nos **armazéns disponíveis no CNC (figura 36)** até que seja necessária para maquinação.

Os principais objetivos são o armazenamento do maior número de ferramentas prontas a utilizar para a maquinação e a troca rápida e automática das ferramentas disponíveis.

Por este motivo são muitas vezes chamados por **dispositivos de troca de ferramenta (ATC)**, embora este termo esteja mais relacionado com o sistema de troca de ferramenta entre a árvore da máquina e o armazém.

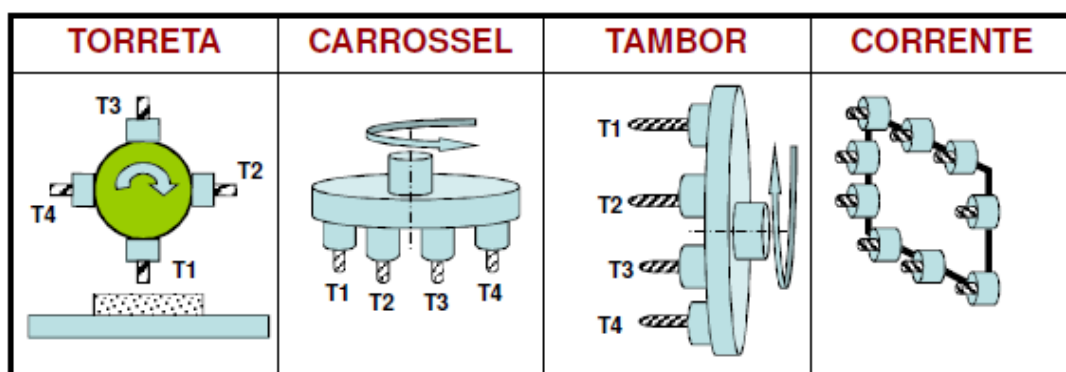


Figura 36 - Tipos de armazéns CNC [28]

A **torreta** é o nome dado aos sistemas usualmente mais utilizados nos tornos (**figura 37**), mas, agora, devido às novas tecnologias de troca de ferramenta ultra-rápida, também é aplicada esta terminologia aos armazéns de ferramentas das fresadoras (**figura 38a**), uma vez que também permite que as ferramentas estejam na própria área de trabalho da máquina, sendo todas visíveis e trocadas no próprio espaço de trabalho sem as chamar do armazém. A grande semelhança entre as 2 tecnologias é a inexistência de um armazém à parte.

O **armazém tipo tambor e carrossel** são circulares e normalmente acompanham centros de maquinação CNC de tamanho médio (**figura 38b**). O nome varia conforme a sua orientação, que influencia também o sistema de troca de ferramenta.



**Os armazéns do tipo corrente** permitem o armazenamento de um maior número de ferramentas, e são, geralmente, aplicados a centros de maquinação CNC de maiores dimensões.

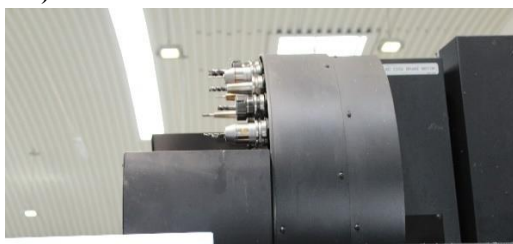
Alguns armazéns de ferramentas (principalmente o de máquinas maiores), permitem o acesso exterior ao armazém mesmo durante o decorrer do processo de maquinação (**figura 38c**). Assim, é possível verificar o estado de uma ferramenta ou mesmo a mudar, sem influenciar o tempo de maquinação e, desta forma, diminuir os tempos improdutivos.



Figura 37 - Torreta de um torno



a) Sistema de torreta da Fanuc Robodrill



b) Sistema de tambor da Dossan



c) Sistema de carrossel com acesso exterior da DMG Mori

Figura 38 - Tipos de armazéns presentes na fábrica

Por vezes é necessário proceder à **reparação ou afiação da ferramenta** de uma ferramenta, quando estas se encontraram desgastadas ou mesmo apresentem alguma quebra ou fratura.

A afiação não pode ser feita de qualquer forma, uma vez que as ferramentas têm características na sua forma que permitem uma otimização da maquinação, e, por isso, deve recorrer-se a máquinas que permitam obter essas mesmas geometrias originais (**figura 39**).

Depois de afiadas, as ferramentas perdem parte do revestimento inicial e embora o tempo de vida seja prolongado a sua performance vai piorar. Por isso, grande parte das ferramentas aproveitadas, são ferramentas

previamente usadas para acabamentos, que apresentam pouco desgaste e podem ser “reutilizadas” para funções de desbaste.



Figura 39 - Dispositivos de afiação de ferramentas

O último ponto que é necessário abordar sobre as tecnologias CNC são as **velocidades e parâmetros de corte**.

Os principais parâmetros de corte são: velocidade de corte ( $V_c$ ), velocidade do fuso ( $n$ ) e velocidade de avanço ( $V_f$ ).

A **velocidade de corte ( $V_c$ )**, em m/min, é um valor específico da ferramenta dado pelo fabricante tendo em conta o material da ferramenta e as operações a que será sujeita (Eq. 2).

A velocidade do fuso ou **velocidade de rotação ( $n$ )**, em rpm, é o número de rotações por minuto da árvore da máquina e é um valor específico da máquina e é calculado em função da velocidade de corte (Eq. 1).

Avanço por minuto, avanço da mesa, avanço da máquina ou **velocidade de avanço ( $V_f$ )**, em mm/min, é o avanço que a ferramenta irá ter em relação à peça em função do avanço por dente e número de dentes da fresa (Eq. 3).

As características da fresa como o seu **diâmetro ( $D_{cap}$ )** e o **número efetivo de dentes ( $Z_c$ )**, são importantes, também, para determinar melhor os parâmetros.

Existem outros parâmetros associados, mas que podem ser calculados através dos anteriores e das características da fresa, como, por exemplo, o **avanço por dente ( $f_z$ )**, em mm, que é um valor relacionado com a velocidade de avanço (Eq. 4) e que influencia o **avanço por rotação ( $f_n$ )**, em mm/rot, usado para determinar a capacidade de acabamento de uma fresa [29].

$$n = \frac{(V_c * 1000)}{\pi * D_{cap}} \quad (\text{rpm}) \quad (\text{Equação 1})$$

$$V_c = \frac{(n * \pi * D_{cap})}{1000} \quad \left( \frac{\text{m}}{\text{min}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

$$V_f = f_z * n * z_c \quad \left( \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

$$f_z = \frac{v_f}{n * z_c} \quad (\text{mm}) \quad (\text{Equação 4})$$

### 3.1.5. Futuro da tecnologia CNC

É algo complicado separar o presente do CNC e o seu futuro, uma vez que as tecnologias atuais têm um enorme potencial de crescimento. Por isso, neste capítulo, vamos debruçar-nos sobre algumas tecnologias que, atualmente, já existem aplicações, mas que tem um potencial enorme em termos de futuro na maquinação CNC.

Nos nossos dias, algo que se ouve falar bastante é o fabrico de tecnologia CNC para uso doméstico e portátil. Este ponto foi inicialmente atingido pela **tecnologia de impressão 3D** que, hoje, é acessível ao público em geral (**figura 40a**).

A **impressão 3D** utiliza a tecnologia CNC para posicionamento da árvore em XYZ, e só difere da CNC porque, ao invés de tirar material, vai acrescentar material e, por isso, é chamada de tecnologia de fabricação aditiva, que funciona através da adição de camadas sobrepostas de material. Os objetos são impressos pela fusão de um plástico próprio, camada por camada, que arrefece e produz a forma final.

Os materiais mais comuns utilizados nas impressoras 3D são plásticos, mas também existem outros processos aditivos por fusão a laser, que permitem tanto a utilização de plástico como metal. A grande diferença é que a matéria-prima é fornecida em formato de um pó ultrafino que é bombardeado por um laser de alta potência até que entre em ponto de fusão para formar as camadas.

Contudo, o desenvolvimento de tecnologias para uso doméstico não ficou pela impressão 3D.

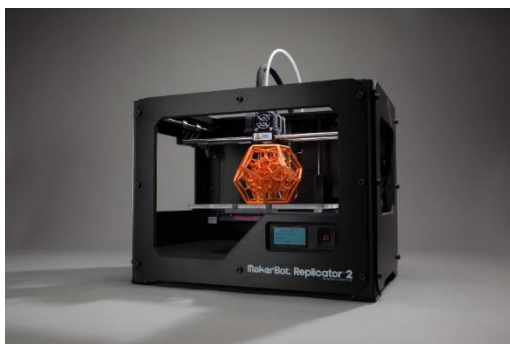
O **Handibot (figura 40b)** é uma fresadora CNC de pequenas dimensões e completamente portátil desenvolvida pela Shopbot, que cria máquinas CNC desde 1996 [30].

A grande vantagem é a sua portabilidade, uma vez que basta colocar em contacto com uma superfície plana e está pronto a executar qualquer um dos programas que tem guardado na sua memória.

Esta tecnologia, embora seja recente, permite a realização da maquinação num espaço idêntico à impressão 3D (XYZ - 152mm x 203mm x 76mm) e garante pre

cisões de até 0.00635mm e uma repetibilidade de 0.038mm, o que o torna um produto muito interessante mesmo para operações de precisão.

Embora ainda seja um pouco limitado em termos de potência, não perde em potencial e pode marcar o início de um grande desenvolvimento na área das tecnologias de produção subtractivas.



a) Impressora 3D



b) Handibot – CNC portátil

**Figura 40 - Tecnologias CNC para uso doméstico**

Outra área que tem crescido muito devido às exigências da indústria é a Maquinação de precisão de peças complexas.

Dentro destas tecnologias, a maquinação contínua a 5 eixos é a que tem vindo a melhorar mais e a cada vez ser mais utilizada e necessária. Mesmo que ainda existam pontos que podem ser melhorados, principalmente na programação CAD/CAM, é, neste momento, a tecnologia que permite a maquinação de peças e superfícies complexas com maior precisão.

Numa indústria que requer cada vez mais complexidade nos produtos criados, a precisão, versatilidade e tempos de maquinação oferecidos pela maquinação de 5 eixos tornam-se cada vez mais uma necessidade para garantir a satisfação do cliente (**figura 41a**).

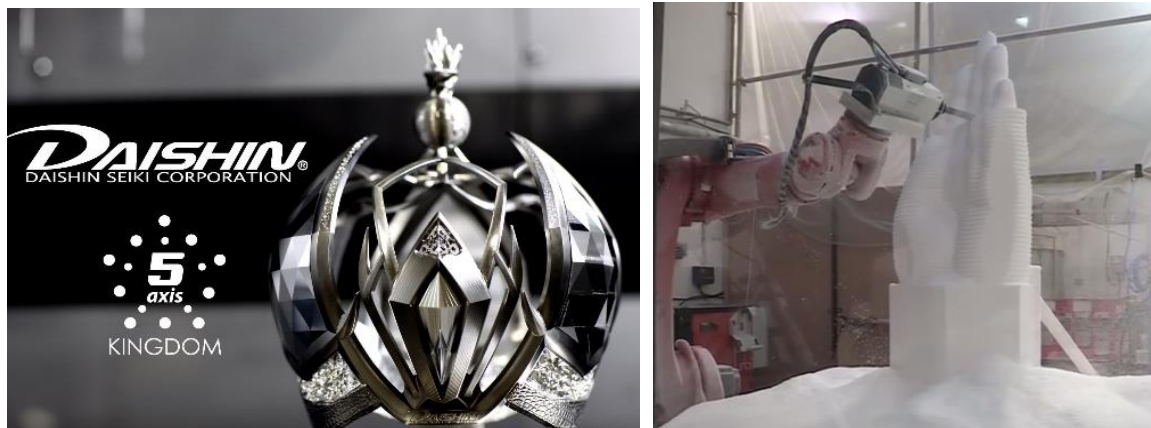
Mas existem ainda limitações que a maquinação de 5 eixos contínuos tem dificuldade em oferecer, designadamente a maquinação em grandes dimensões.

Uma das respostas para combater estas limitações, foi a robótica industrial, que, hoje em dia, traz imensas possibilidades diferentes à indústria.

Para aproveitar essas mais valias, é tempo de voltar às origens e utilizar as tecnologias da robótica no mundo da indústria da maquinação de precisão e utilizar a complexidade de movimentos que o elevado número grau de liberdade de um braço robótico permite e o seu grande alcance que é superior ao das CNC e aplicar à maquinação de peças complexas com dimensões (**figura 41b**).

Claro que ainda é uma ideia em desenvolvimento. Ainda tem limitações como a baixa precisão (se comparado com as máquinas CNC atuais), limitação de rigidez do posicionamento em corte, que limita a gama de matérias que podem ser maquinados e rotação limitada do cabeçote.

Ainda assim, é uma tecnologia útil e com grandes perspectivas de desenvolvimento.



a) Peça complexa realizada a 5 eixos contínuos

b) Maquinagem com braço robótico

**Figura 41 - Tecnologias de maquinação de peças complexas**

A **maquinagem híbrida** é outra tecnologia em franco desenvolvimento e é considerada, por muitos, a futura forma da indústria da maquinação de precisão.

Consiste em criar um bruto no próprio centro de maquinação por soldura a laser de partículas de metal (FDM). Esse bruto já tem uma forma aproximada da forma final sendo apenas necessário realizar operações de acabamento utilizando os processos de maquinação já existentes.

Esta tecnologia vai trazer um novo conceito para a versatilidade permitida por uma máquina CNC e, devido à sinterização de um bruto que já apresenta uma forma aproximada da final, permite a diminuição do volume de aparado e desperdício de metal na maquinação, o que também significa menor desgaste das ferramentas, uma vez que não precisa de operações de desbaste. Além dessa característica, os tempos de maquinação obtidos são inferiores aos atuais e permite ainda a criação de uma peça por partes ou módulos, possibilitando a realização de excertos (**figura 42**) numa peça existente em qualquer das suas superfícies ou mesmo a maquinação de interiores, dado que com este sistema se pode acrescentar uma camada exterior após a maquinação de uma camada interior, viabilizando a maquinação de peças com interiores complexos através desta abordagem de maquinação por camadas.



**Figura 42 - Fundição de um entalhe numa CNC híbrida**

Esta tecnologia só é praticável para a produção de séries pequenas ou unitárias e de protótipos, também está, ainda, limitada aos materiais permitidos pelo processo aditivo utilizado na criação do bruto e ao nível do *software* de CAD/CAM que ainda não permitem a realização de ambas as etapas associadas, sendo utilizado um *software* na parte aditiva e outra para a subtrativa.



Além das possibilidades trazidas pela maquinação híbrida, algumas companhias já começaram a desenvolver centros de maquinação que juntam as tecnologias de **maquinação híbrida e de multitasking** (figura 43).

Um exemplo, é a INTEGREX i-400AM da Mazak, que é um centro de maquinação *multitasking* que tem incorporado também um cabeçote extra que permite a sinterização de metal.

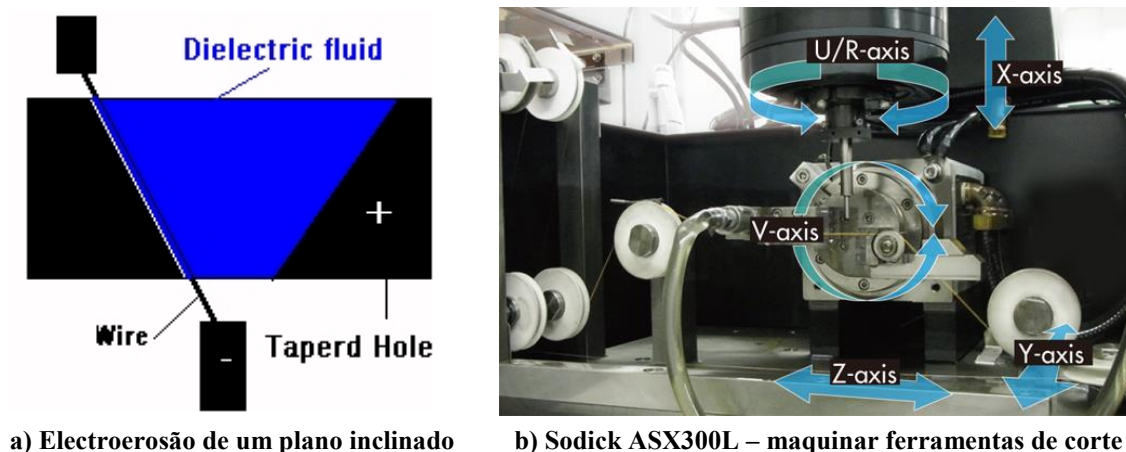


Figura 43 - INTEGREX i-400AM da Mazak [31]

Deixando um pouco as tecnologias de corte, atentemos, agora, na existência do desenvolvimento bastante interessante noutras áreas como é o caso da electroerosão.

A **electroerosão por fio**, já possibilita mais do que o simples “corte” em 3 eixos. Uma vez que é composta por 2 cabeças móveis cada uma podendo se deslocar em XY. Isto permite um desfaseamento entre as cabeças e criação de planos de corte inclinados (figura 44a). Muitos operadores já consideram esta tecnologia como 5 eixos, embora não seja correto.

Mediante a situação apresentada e com as elevadas exigências na geometria e precisões das peças apresentadas pelo setor aeronáutico, os produtores de máquinas de electroerosão já começaram a desenvolver tecnologias que tornem possível realizar a maquinação de peças complexas recorrendo a rotações da mesa de trabalho, sendo que já existem alguns sistemas de 5 eixos externos que podem ser aplicados às electroerosoras (figura 45a). Algumas electroerosoras contam já com a inclusão de eixos adicionais para aplicações mais específicas, como para a maquinação de ferramentas de corte (figura 44b) [32] [33].

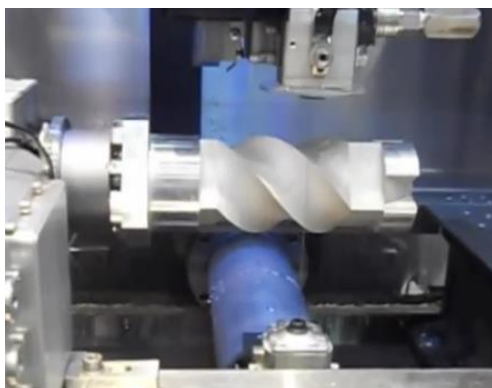


a) Electroerosão de um plano inclinado

b) Sodick ASX300L – maquinação ferramentas de corte

Figura 44 - Tecnologias de electroerosão por fio

Também já existem sistemas que podem ser aplicados nas máquinas de **electroerosão por penetração** que permitem a maquinação com o quarto eixo adicional (XYZ+C) e até mesmo o quinto eixo adicional (XYZ+AC) (figura 45b) [34].



a) Sistema de mesa 5 eixos aplicado à electroerosora de fio



b) Sistema de 5 eixos aplicado à electroerosora de penetração

**Figura 45 - Sistemas de 5 eixos aplicados às electroerosoras**

Além dos avanços tecnológicos nas máquinas CNC, também as tecnologias associadas às ferramentas estão em constante desenvolvimento. Este desenvolvimento está na constante procura da criação de ferramentas de corte que possuam melhores características, mas não só.

Um exemplo é o aparecimento **dos sistemas multiferramentas** nos tornos mais recentes e máquinas *multitasking* [35] que permitem a indexação da árvore, assim possibilitam a utilização de várias ferramentas diferentes numa só posição (**figura 46**), e assim aumentar o número de ferramentas sem aumentar a armazenagem e diminuir o tempo de troca de ferramenta.



**Figura 46 - Sistema multiferramentas para torno – Sandvick**

Outra tecnologia que se prevê uma implementação na indústria da maquinação CNC é o conceito de **Indústria 4.0**. Este conceito tem como objetivo melhorar a rastreabilidade, o controlo e a otimização de todo o processo de maquinação.

Através do uso da Internet das coisas (*Internet of things*), permite a comunicação entre máquinas e sistemas de controlo de forma a trabalharem em conjunto e alcançarem uma melhor compreensão do processo e da organização dos dados e das informações em formato digital numa *cloud informática*, sendo estas acessíveis em tempo real, através da Internet em qualquer lugar em tempo real, mas de forma segura.

Este controlo sobre as operações vai tornar mais fácil prever possíveis falhas e a tomada de melhores decisões para resolver esses problemas tendo em vista o aumento da produtividade e eficiência.

Este controlo potenciado pela Indústria 4.0 pode ser bastante apoiado pelos desenvolvimentos na tecnologia associada à **metrologia dimensional e geométrica**, por exemplo nas áreas do controlo dimensional através de medições indiretas.

Hoje, o aumento de precisão das **tecnologias de scan 3D**, tornam-nas em alternativas muito atrativas para a área da metrologia, uma vez que apresentam um grande alcance e rapidez (**figura 47a**).

Os sistemas mais comuns são o **Scan 3D de Luz branca** e o **Scan 3D a laser** [36] [37].

O **scan 3D de luz branca** apresenta resultados mais precisos nas medições (até 0.025mm) e também permite medições mais rápidas e mais seguras. Por outro lado, o **Scan 3D a laser** é uma tecnologia mais barata e permite medições em locais com pouca iluminação, embora só garanta precisões de 0,1mm.

Estas tecnologias ainda são maioritariamente utilizadas em aplicações de engenharia inversa ou para fazer o levantamento de superfícies, mas o seu desenvolvimento tem tornado uma tecnologia interessante para a metrologia também.

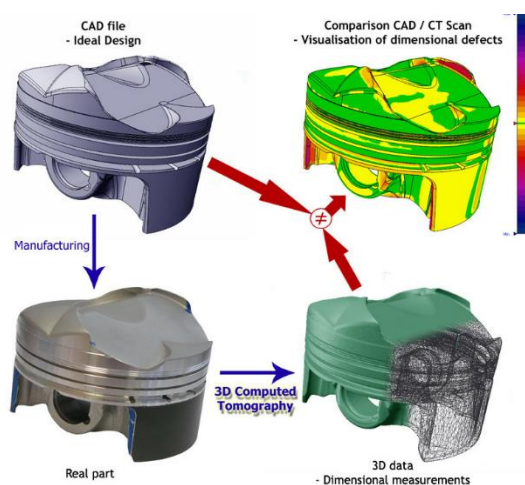
Outra tecnologia interessante para a metrologia é a **tomografia computadorizada (CT)**, também chamada de raio x industrial ou imagem industrial. É uma metodologia que utiliza raios-x para produzir resultados tridimensionais (3D) ao colocar um objeto em um estágio rotacional entre um tubo de raio x e um detetor de raios X, girando o objeto em 360 graus e captando imagens em intervalos específicos.

Atualmente é a única maneira de obter informação dimensional 3D do interior de uma peça sem cortar ou destruir o objeto e permite a criação de uma nuvem de pontos com uma única varredura, que pode ser usada para realizar vários tipos de controlo como a análise de vazio, inspeção dimensional, porosidade e engenharia inversa (**figura 47b**).

Embora não seja tão conhecida devido à especificidade das suas aplicações, esta tecnologia permite uma medição rápida de peças em plástico, cerâmica, materiais compósitos, magnésio e alumínio garantindo precisões inferiores a 0,02mm [38].



a) Scan 3D de um automóvel



b) Controlo com uso de tomografia computadorizada

Figura 47 - Tecnologias de medição sem contacto

Mas as tecnologias e medição por contacto continuam a garantir medições mais precisas e as CMM estão em constante desenvolvimento.

A principal aposta foi a inclusão de **múltiplos sistemas de medição** e tecnologias, numa só CMM de maneira a atingir um novo nível de versatilidade nas medições (**figura 48**). O primeiro passo foi a inclusão de um sistema de visão adicional às tecnologias de toque já existentes [39].



Figura 48 - Hexagon - CMM com múltiplos sensores



Hoje, os modelos de CMM mais recentes podem ter incluídos vários tipos sensores diferentes simultaneamente, como sistemas de toque a 5 eixos, sistema de visão, e mesas com eixos rotativos semelhantes aos existentes nas CNC 5eixos, o que permite uma versatilidade e flexibilidade imensa às CMM.

Uma nova tecnologia, associada às ponteiras de toque, é a PH20 que é um produto da Renishaw, a maior fabricante de ponteiras para CMM.

O PH20 à primeira vista parece um simples sistema de ponteira a 5 eixos como os mencionados anteriormente, mas é revolucionário por inúmeras características. Além de ser capaz de realizar medições mais rápidas e posicionamentos mais exóticos, pode ser aplicada em qualquer CMM permitindo a medição a 5 eixos e também realiza medições por scan a uma velocidade muito superior (figura 49) [40] [41].



Figura 49 - Sistema de ponteira de 5 eixos da Renishaw

A Renishaw também é a criadora do “*Equator*”, um sistema CMM baseado na tecnologia de “tricept” para o seu posicionamento em XYZ que pode ser considerado portátil e está equipado com ponteiras de toque à semelhança de uma CMM normal (figura 50a).

Este sistema pode ser utilizado como uma CMM normal ou ser aplicada em fábrica como uma ferramenta de controlo para uma série de peças, uma vez que permite de uma maneira simples e barata a comparação de uma peça padrão com a peça a medir [42].

Outro sistema que apresenta uma portabilidade elevada e inovação, é a CMM de bancada, que permite a medição manual através de uma ponteira sem fios (figura 50b). A localização dessa ponteira é rastreada através de um sistema de câmara na bancada que capta a luz infravermelha emitida pela ponteira, o que garante uma liberdade total ao operador na medição além de garantir precisões de até 3 µm [43] [44].



a) Equator da Renishaw



b) CMM de bancada (bench-top CMM)

Figura 50 - Tecnologias de metrologia com portabilidade



## 3.2. Sistemas CAD/CAM

O sistema de CAD/CAM/CNC é uma ferramenta essencial, uma vez que possibilita de forma rápida, precisa e prática, o planeamento de operações de maquinação a partir do modelo CAD de uma peça e transformar essas operações em linguagem que possa ser interpretada pela CNC.

### 3.2.1. Evolução dos sistemas de CAD/CAM

Os sistemas CAD/CAM são desenvolvidos devido à necessidade de uma interface que permitisse a realização dos programas de maquinação a partir de características da peça e facilitasse a programação de trajetórias mais complexas.

O APT (Automatically Programmed Tool) foi a primeira linguagem que permitia a organização do processo de maquinação através de instruções (semelhante à linguagem ISO atualmente utilizada) e a sua conversão em linguagem máquina e é considerado o antecessor dos sistemas CAM modernos. Foi criado e refinado no final da **década de 1950 e início dos anos 1960** para auxiliar na criação das trajetórias complexas que uma ferramenta deveria realizar no espaço. A versão original foi criada antes mesmo de FORTRAN estar disponível e foi a primeira linguagem ANSI standard [45] [46].

Patrick J. Hanratty é considerado o pai do CAD/CAM e as suas contribuições datam **de 1957**, quando ele desenvolveu o Pronto, a primeira linguagem comercial de programação NC, enquanto trabalhava na General Electric.

**Em 1959**, a General Motors iniciou um projeto experimental para digitalizar, armazenar e imprimir os muitos esboços de projeto que estão sendo gerados nos vários departamentos de design da GM. Quando o conceito básico demonstrou que poderia funcionar, eles começaram o projeto DAC-1 - Design Automated by Computer (**figura 51a**).

**Em 1961**, Hanratty mudou-se para a GM, onde ajudou a desenvolver o DAC, o primeiro sistema CAD/CAM para usar gráficos interativos. Uma parte do projeto DAC foi a conversão direta de diagramas de papel em modelos 3D (**figura 51b**), que foram então convertidos em comandos APT e maquinados em fresadoras CNC. Em novembro **de 1963**, um projeto para a tampa de um tronco mudou do esboço de papel 2D para o protótipo de argila 3D pela primeira vez [7] [47] [48] [49].



a) Interface do DAC-1



b) Máquina para conversão do desenho em papel para o computador

**Figura 51 - Sistema DAC-1 e componentes associados**

**Em 1971** escreveu Adam, o primeiro sistema interativo de desenho, elaboração e fabricação de gráficos comercialmente disponível e podia ser executado em praticamente qualquer máquina.

Atualmente, estima-se que 90% dos *softwares* de desenho comerciais possam ter as suas raízes no programa original do Dr. Hanratty, chamado Adam.

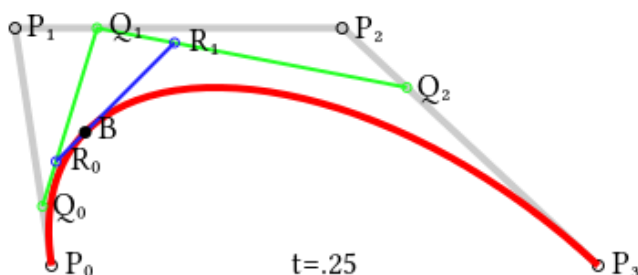
Também o trabalho pioneiro de Pierre Bézier no desenvolvimento de algoritmos matemáticos representativos de curvas, foi de suma importância para o progresso da tecnologia CAD/CAM. **Em 1968**, a “curva de Bézier” (**figura 52a**), desenvolvida a partir do algoritmo criado por Paul de Casteljau, torna possível a representação de curvas em computador com grande precisão e evolui, mais tarde, para a representação de

superfícies complexas com as “superfícies de Bézier”. Bézier é conhecido igualmente pela criação do UNISURF, um sistema CAD/CAM pioneiro, quando trabalhava como engenheiro da Renault [50] [51].

Outra figura muito importante foi Ivan Sutherland considerado o “pai dos gráficos computadorizados” e que abriu novos caminhos na modelagem 3D auxiliada com computador, simulação visual, base para computação gráfica e CAD/CAM.

Em 1963, cria o "Sketchpad", que permite aos utilizadores usar uma lightpen (figura 52b) para criar desenhos de engenharia no computador, que, posteriormente, podiam ser manipulados, duplicados e armazenados.

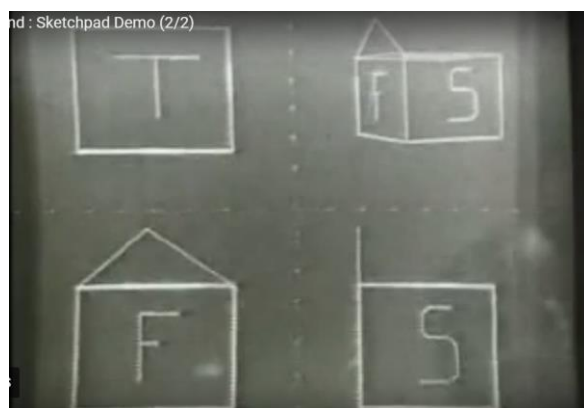
O Sketchpad abriu a porta para a computação gráfica e incluiu recursos como utilização da memória do computador para armazenar objetos desenhados, construção de linhas mais simples, a capacidade de ampliar ou reduzir e técnicas para construção de linhas com grande exatidão. Foi a primeira interface de usuário gráfica (GUI) muito antes do termo ter sido inventado e já permitia uma visualização primitiva de objetos em 3D recorrendo a projeções de planos (figura 52c), semelhante ao desenho de engenharia [7] [47] [52].



a) Curva de Bézier Cúbica



b) Utilização do Sketchpad com a lightpen



c) Visualização em 3 vistas e em perspectiva (3D primitivo) no Sketchpad

Figura 52 - Evolução do CAD

### 3.2.2. Futuro dos sistemas CAD/CAM

A contínua melhoria da interface, facilidade de uso, rapidez de processamento, realidade, simulação e simplicidade de programação, dado que o desenvolvimento da tecnologia CNC torna necessário transformar os sistemas de programação para serem cada vez mais simples de usar, mais intuitivos e realistas. Isto vai permitir ao programador cada vez mais facilidade na programação de diferentes tipos de estratégias para inúmeros tipos de peças complexas com o mínimo esforço, máxima segurança e controlo total.

Hoje em dia já é possível aprimorar as propriedades visuais dos modelos 3D. Isso, no entanto, é uma abordagem muito limitada. O conceito **CAD4D** é uma revolução na forma de pensar, que acrescenta a dimensão tempo ao processo 3D existente.

Consiste na integração de análise em tempo real de técnicas de realização que permitem aos desenhadores realizar análises dinâmicas de fluidos ou métodos de elementos finitos (FEM) ainda na fase de

projeto. Ser capaz de realizar uma análise de FEM com uma perspectiva contextual do modelo desenvolvido e seu ambiente definitivamente economizará tempo e dinheiro.

Outra grande possibilidade no futuro do CAD/CAM é a **padronização do formato CAD** com base em XML onde os formatos de CAD seguirão o desenvolvimento em aplicativos do Office, onde o formato baseado em XML ODF (formato de documento aberto) é o padrão.

Esta padronização permitiria aos utilizadores a exportação e importação do ficheiro, mesmo para máquinas diferentes sem necessidade de transformar os ficheiros. Isso aumentaria a interoperabilidade entre CAD e aplicativos relacionados, como CAE e o CAM. Os modelos 3D criados em CAD podem ser apresentados imediatamente em navegadores da Web que poderão exibir modelos 3D.

A abordagem convencional do uso de um computador é a utilização teclado e rato, um fato que não é diferente para a utilização dos sistemas de CAD/CAM.

Os **sistemas de realidade virtual** podem vir a mudar totalmente a forma da interação entre o Homem e o Computador e poderá influenciar a maneira como os processos de CAD / CAM são realizados.

Uma previsão muito direta é a utilização das próprias mãos para modelar e moldar peças, como se o objeto estivesse realmente na mão. A melhor parte seria que a chapa metálica poderia ser dobrada sem a necessidade de força real e poderia ser feita em realidade virtual o que lhe permitiria visualizar todo o processo.

O OnShape é atualmente a única solução totalmente baseada em nuvem para engenheiros profissionais CAD/CAM, apesar que outros fornecedores de *software* como o Autodesk e o Dassault Systems tenham produtos baseados em nuvem, ainda não permitem o uso de todas as suas funcionalidades potenciais. A criação de um sistema **CAD/CAM totalmente na Cloud** seria um grande desenvolvimento nesta área, uma vez que permitiria o acesso à tecnologia em qualquer lugar sem *software* específico [53] [54].



## 4. Descrição das principais etapas envolvidas na maquinação de um pedido

### 4.1. Preparação da produção

A preparação da produção é uma etapa fundamental para organizar e rentabilizar a produção. Basicamente consiste em identificar todos os parâmetros relativos à maquinação e das suas limitações, de modo a tomar um conjunto de decisões de forma a obter o processo de produção mais económico e viável para uma dada peça.

Cada peça metalomecânica tem características próprias que vão influenciar qual o processo mais adequado e económico para a sua maquinação:

**As dimensões e a geometria da peça** são determinantes na escolha do tipo de processo de maquinação e máquina CNC. Se a peça for prismática então deverá ser maquinada numa fresadora CNC, mas se for uma peça de revolução deve ser torneada. O seu tamanho também pode impossibilitar a maquinação caso o espaço e trabalho seja inferior às dimensões da peça.

**O material** é outro fator que deve ser levado em consideração, já que os parâmetros de maquinação variam entre materiais e os cuidados com a maquinação são diferentes, como, por exemplo, na deformação de um plástico se aplicarmos a mesma pressão de aperto que é imposta a um metal.

**As sobre-espessuras** de material associadas ao material também devem ser levadas em conta uma vez que podem significar a diferença entre a realização ou não realização de um determinado processo ou operação de maquinação.

**O acabamento superficial** pode exigir a inclusão de uma operação extra de acabamento no final.

**As tolerâncias dimensionais e geométricas** exigidas são fundamentais na escolha da máquina, uma vez nem todas as máquinas garantem a mesma precisão.

A necessidade de **tratamentos térmicos os superficiais**, devem sempre ser realizados após conclusão da maquinação, mas, se tal for impossível, a maquinação posterior deve ter em conta as alterações das características do material com o tratamento.

**O tamanho do lote ou quantidade de peças** pode permitir uma abordagem mais iterativa e mais simples se for pequena, ou obrigar à geração de documentação e de um processo de maquinação bem definido no caso de quantidades que impliquem produção em série.

Com o estudo das características da peça é mais fácil identificar qual a máquina mais adequada, se é necessário mais que uma máquina para garantir as geometrias e precisão pretendidas, ou se estamos perante uma série de muitas peças em que seja viável e/ou necessário a criação de uma célula dedicada (automatizada ou não) com várias CNC para a sua produção em série.

É também importante ao preparar uma nova peça, verificar se já foi feita alguma outra peça semelhante para adaptar o processo utilizado à nova peça (**estudo de similitude**), de forma a reduzir os tempos de preparação e melhorar o processo de maquinação [28] [55] [56].

**Os principais objetivos** com a realização da preparação da produção e do estudo de similitude e das características das peças são:

- Reduzir os tempos improdutivos durante a maquinação e entre fases.
- Garantir um processo de maquinação o mais económico e rentável, de modo a reduzir a percentagem de peças não-conforme.
- Permitir a preparação do posto de trabalho e ferramentas associadas antes da maquinação.
- Evitar grandes deslocações após operações de acabamento, que implicam mais custos.
- Realizar os tratamentos térmicos o mais tarde possível, de preferência após a peça terminada para diminuir as probabilidades de deformação da peça.

Existem **duas formas diferentes de realizar esta preparação da produção**.

A primeira mais convencional é a preparação de um processo de maquinação por uma entidade responsável definido para a peça, que deve ser representado por um conjunto de documentos com procedimentos a serem cumpridos pelo operador durante o processo de maquinação.

A segunda abordagem é mais recente e consiste em ser o próprio operador, com base na experiência e conhecimento, quem define os passos da maquinação ao longo do seu processo.

Este último é mais aplicado para a produção de quantidades pequenas ou médias de peças, enquanto o primeiro é amplamente utilizado na produção de grandes séries.

Em ambos os casos é importante dar **uma sequência lógica** ao processo, e esta pode ser dada de uma maneira simplificada respondendo às perguntas abaixo.

1. Qual a máquina ou máquinas a usar? Estão disponíveis no momento?
2. Qual a dimensão e geometria da peça em bruto, para que permita a maquinação?
3. Quais as operações necessárias para a execução da peça, de modo a que as tolerâncias dimensionais e geométricas sejam cumpridas?
4. Qual a sequência de operações que torna o processo o mais economicamente viável?
5. Como fixar a peça de maneira a que essas operações sejam realizadas sem qualquer inconveniente?
6. Quais as ferramentas a serem utilizadas?

Para ajudar a responder a algumas destas perguntas, existem ferramentas que sistematizam algumas das fases necessárias para a elaboração de um processo de maquinação eficaz, como vamos ver em seguida.

## 4.2. Sistemas de posicionamento e fixação

Depois da seleção de qual a máquina (ou máquinas) são as mais adequadas para a maquinação da peça, o próximo passo é escolher o sistema de aperto mais adequado para a fixação da mesma. Claro que a seleção do mesmo vai, uma vez mais, depender das características da peça a maquinar e da máquina CNC que vamos utilizar e da aplicabilidade dos sistemas de fixação à máquina (**tabela 4**).

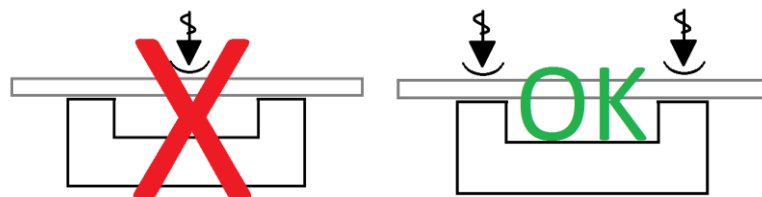
**Tabela 4 - Tipos de sistemas de aperto disponíveis para cada tecnologia**

Sistemas de Fixação	Fresadora	Torno	Electroerosão (e outros)
<b>Prensa (mecânica, hidráulica...)</b>	SIM	Não	Sim
<b>Ponto Zero</b>	Sim	Não	-
<b>Bucha</b>	Sim	SIM	Sim
<b>Magnético</b>	Sim	-	Sim
<b>Vácuo</b>	Sim	-	-
<b>Grampos</b>	Sim	-	Sim
<b>Batentes</b>	Sim	-	Sim
<b>Luneta</b>	-	Sim	-
<b>Contra-ponto</b>	Não	Sim	Não

Nos tornos, a bucha é o sistema de aperto mais comum e versátil, enquanto nas fresas o sistema de aperto e fixação mais usado é normalmente a prensa mecânica.

A escolha do sistema de aperto também pode ser influenciada pela quantidade de peças. Se forem poucas peças a serem fresadas é natural recorrer a um sistema mais versátil como a prensa, mas para grandes séries é necessário recorrer a sistemas que garantam a repetibilidade do posicionamento, como um sistema de ponto zero ou garantir o posicionamento com batentes ou gabari próprio e a fixação com uma prensa. Esta repetibilidade é importante, uma vez que assim se evita a perda de tempo extra para tirar o zero-peça a cada maquinação.

Também se deve ter uma especial atenção às superfícies de aperto e verificar se o aperto não vai provocar deformações na peça (**figura 53**), mesmo que implique o uso de um sistema de fixação mais complexo.

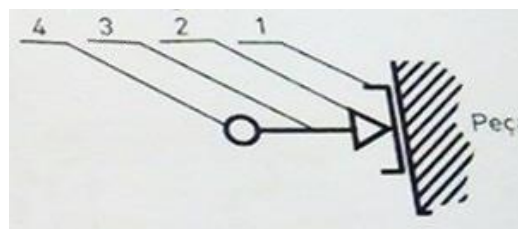


**Figura 53 - Exemplos de boas e más escolhas de aperto**

Na elaboração dos documentos de uma sequência de maquinação é importante definir também quais os sistemas de aperto a ser usados e quais as faces nas quais vão ser atuados na ficha de fase.

Por isso existe uma simbologia representativa (**figura 54**) dos mecanismos de posicionamento e fixação que segue a norma francesa NF E 04-013 e estes devem estar representados no esquema da peça em cada fase. [28] [55]

- 1) Contato com a superfície ou tipo de apoio
- 2) Função do elemento tecnológico
- 3) Natureza da superfície da peça
- 4) Tipo de tecnologia



**Figura 54 - Exemplo de simbologia**

Como podemos reparar no exemplo, a simbologia pode variar consoante a natureza da superfície da peça (**tabela 5**), as tecnologias de aperto envolvidas e o tipo de contacto do aperto (**tabela 6**).

**Tabela 5 - Representação do aperto em desenho de engenharia**

	Representação
Contato com superfície maquinada	
Contato com superfície bruta	

**Tabela 6 - Exemplos de simbologia associados à fixação de uma peça [28]**

Ação sobre a peça em termos de força		Tipo de superfície em contato com a peça	
Tecnologia	Símbolo	Tecnologia	Símbolo
Apoio Fixo		Contato pontual	
Centragem fixa		Contato liso	
Aperto		Contato sulcado	

Desta forma o operador da CNC, através do desenho na ficha de fase, pode identificar qual o tipo de aperto que deve realizar e onde o aplicar.

### 4.3. Cadeia de Cotas - cotas funcionais versus cotas de fabrico

Na fase de desenvolvimento o produto final é um desenho técnico com a cotação funcional da peça em questão. Mas estas cotas não são representativas do processo industrial escolhido para obter a peça em questão.

É necessário criar cotas de fabrico, que é uma cotação na qual o operador CNC pode agir sobre elas e estas são, normalmente, a distância entre o sistema de apoio e a ferramenta de corte.

Também devem ser escolhidas de forma a facilitar o controlo dimensional pela parte do operador, tendo em conta quais os equipamentos de medição disponíveis e garantir uma medição o mais precisa possível. Portanto as cotas de fabrico irão depender da sequência de maquinação e do aperto adotado em cada fase [28]. Estas cotas de fabrico ainda podem ser divididas em 2 tipos:

- Cotas diretas – Quando as cotas de fabrico coincidem com as cotas funcionais.
- Cotas indiretas – Quando as cotas de fabrico não coincidem com as cotas funcionais do desenho de definição, uma vez que as cotas de fabrico correspondentes não são representativas do processo de maquinação.

Estas últimas necessitam de ser calculadas por um processo designado por cadeia de cotas ou simulação da maquinação e devem apresentar uma tolerância menor ou igual que as cotas funcionais correspondentes.

Portanto é importante ter atenção às cotas de fabrico que são escolhidas para representar o processo de maquinação. O exemplo seguinte permite ilustrar os erros mais comuns nesta atribuição (**figura 55**).

- a) **Desenho de definição com as cotas funcionais.** No qual não se têm cuidado com como vai ser fabricada a peça, mas sim com as tolerâncias e cotas essenciais para a função da peça.
- b) **Cotagem de fabrico mal efetuada:**
  - Cota 6 é impossível medir sem recorrer a um CMM e não é medida a partir do referencial
  - Cota 4,10 não é medida a partir do referencial nem permite uma medição da posição do furo
  - Cota 4,50 não é medida a partir do referencial
- c) **Cotagem de fabrico bem efetuada.** Embora as cotas 4 e 2,8, por limitações tecnológicas, têm que ser medidas recorrendo a uma CMM ou outro equipamento.

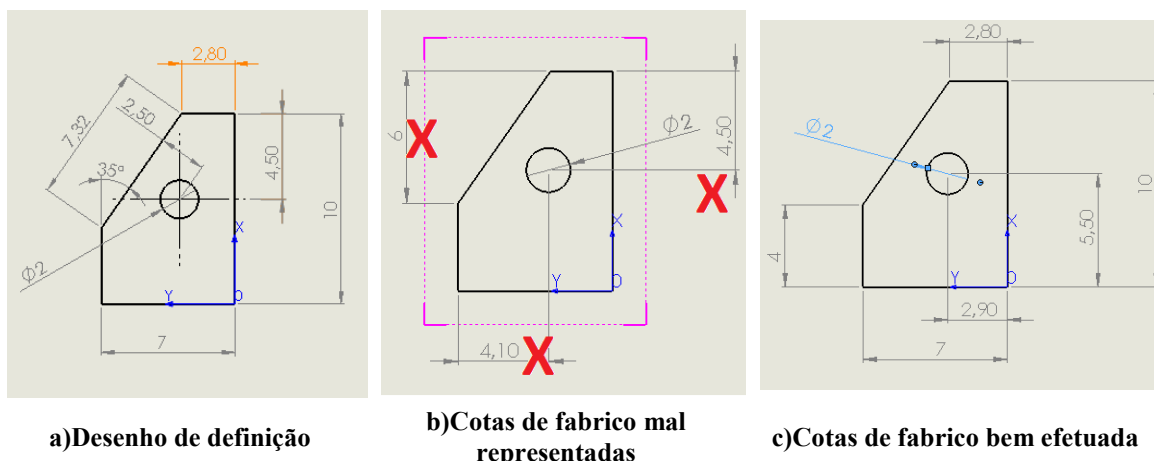


Figura 55 - Exemplo representativo da realização da cotagem de fabrico

A **Cadeia de Cotas** tem como objetivo calcular a tolerância adequada das cotas de fabrico de modo a cumprir a cotagem funcional.

Para facilitar este cálculo, recorreremos à substituição das cotas por vetores de modo a dar um aspeto mais gráfico e simples.

Este cálculo é dado pela fórmula:

$$Tolerância\_Cota\_Funcional \geq \sum Tolerâncias\_Cotas\_Fabrico$$

Para compreender mais facilmente este processo, vejamos o seguinte exemplo (**figura 56**) no plano XY, que representa uma peça prismática simples:

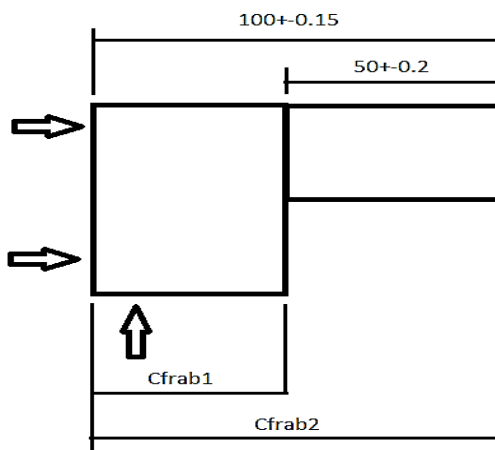


Figura 56 - Exemplo - Cadeia de cotas



As cotas de fabrico devem ser medidas a partir das superfícies de apoio.  
Assim teremos as seguintes relações entre as cotas funcionais e as de fabrico:

$$0,15 \geq C_{fab2}$$

$$0,2 \geq C_{fab1} + C_{fab2}$$

Se resolvermos este sistema de equações um resultado possível é:  $C_{fab1}=0,1$  e  $C_{fab2}=0,1$

$$0,15 \geq 0,1 \rightarrow ok$$

$$0,2 \geq 0,1 + 0,1 \Leftrightarrow 0,2 \geq 0,2 \rightarrow ok$$

Depois do cálculo do valor é necessário verificar se os valores obtidos, estão dentro do intervalo económico para a operação de maquinação em questão (**tabela 7**). Caso negativo, deve-se repetir os procedimentos.

**Tabela 7 - Intervalos de tolerância económicos para cada operação [28]**

Processo	Desbaste (mm)	Acabamento (mm)
Corte	2	-
Torneamento/ fresagem	0.5	0.05
Furação	0.3	0.1

No caso acima ilustrado, abordámos um exemplo muito simples e apenas representativo, sendo que os casos naturais em ambiente industrial são muito mais complexos e exigem uma abordagem mais cuidada.

Para estes casos é necessário a realização de **uma simulação da maquinação** da qual se elabora um **esquema de simulação** da maquinação, que é um documento no qual engloba-se os seguintes aspetos:

- Esboço com sobre-espessura mínima;
- Cotas funcionais;
- Cotas de fabrico na ordem da sequência de maquinação;
- Os valores das tolerâncias das cotas funcionais, cotas de fabrico e sobre-espessura que sejam conhecidos;
- As relações entre as cotas de fabrico e a sua influência na cadeia de cotas para cada cota funcional.

Este esquema tem um aspeto muito gráfico para facilitar a sua organização e compreensão e deve ser realizado para cada direção de fabrico XYZ, para uma completa definição das cotas de fabrico.

#### 4.4. Cotas das peças brutas para maquinação -sobre espessuras

A sobre-espessura para maquinação é um fator importante que vai determinar as cotas do esboço (peça em bruto).

Para cada tipo de operação que queiramos realizar posteriormente, devemos deixar uma sobre-espessura para possibilitar essa operação (**tabela 8**).

**Tabela 8 - Valores típicos de sobre espessura mínima para diferentes modos de maquinação [28]**

Processo de maquinação	Operações	Sobre-espessura mínima (mm)
Torneamento, Fresagem	Desbaste pesado	3 a 1,5
	Desbaste	0,5 a 1
	Acabamento	0,2
Retificação	Acabamento	0,05
Brochagem	Acabamento	0,05
Rodagem	Acabamento	0,03

Tomando o exemplo de uma peça genérica (**figura 57**) é importante os seguintes passos para a escolha do bruto:

1. O bruto deve ter a geometria mais simples possível, mas que permita a maquinação da peça, de forma a reduzir custos.
2. Escolha da sobre-espessura adequada para o bruto (**vermelho**), neste caso de +1mm.
3. Adicionar uma sobre-espessura extra (**azul**) associada à tolerância económica (**tabela 7**) associada ao processo de obtenção do bruto. Neste caso utiliza-se o corte para obter o bruto que tem um “erro” associado à maquinação de 2mm.

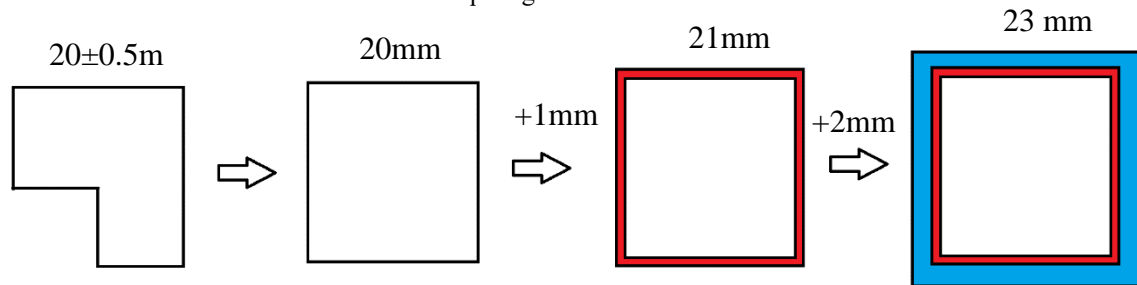


Figura 57 - Exemplo do cálculo da sobre-espessura

Além da sobre-espessura necessária para permitir a maquinação, em certos casos pode ser interessante a utilização de uma sobre-espessura extra de modo a simplificar o processo de maquinação. Esta sobre-espessura extra é conhecida por **postiços de maquinação ou zonas suplementares**.

São utilizados para facilitar o posicionamento, garantir um aperto mais estável ou permitir o contraponto em operações de torno sem marcar a peça final.

#### 4.5. Escolha das superfícies de partida para maquinação

A escolha da superfície de partida é uma outra etapa importante na preparação da produção se não for bem selecionada pode resultar na não conformidade da peça a maquinada [28] [55].

Para prevenir e evitar possíveis erros nas peças e garantir as tolerâncias requeridas, existem algumas regras e recomendações que são uteis para uma boa escolha da superfície de partida para a maquinação.

1. Realizar o aperto respeitando a dimensão com menor tolerância entre a superfície de partida (bruta) e a superfície a ser maquinada (**figura 58**), uma vez que **garante maior precisão na maquinação da cota entre a superfície do aperto e a superfície a maquirar**;
2. Possibilitar o maior número de operações de maquinação na mesma fase;
3. Possibilitar a maquinação de superfícies que permitam o aperto nas fases de maquinação seguintes;
4. Garantir a melhor fixação da peça possível, para evitar possíveis deslizamentos.

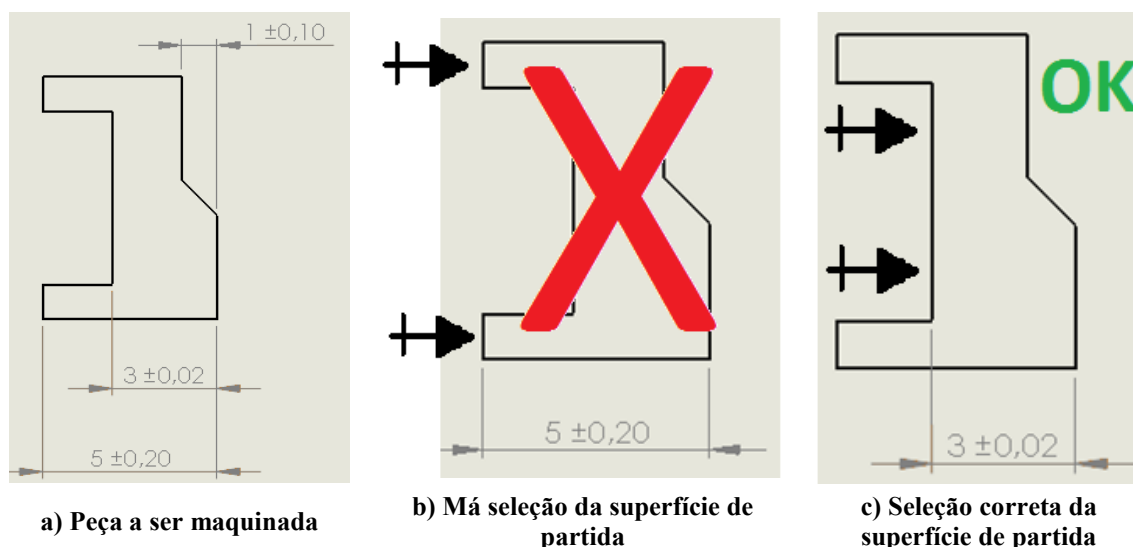


Figura 58 - Seleção de superfície de partida da maquinação

Outra recomendação a ter em conta é que apenas na primeira fase (1º Aperto) da maquinação deve-se fixar as peças em faces em bruto. Por isso devemos ter o cuidado de selecionar uma face de partida que permita maquinar a peça de forma a preparar novas superfícies que permitam o restante da maquinação.

#### 4.6. Seleção das ferramentas de corte

As ferramentas de corte desempenham um papel fundamental na maquinação e para uma seleção adequada das ferramentas de corte deve se ter em conta os seguintes fatores [56]:

**O tipo de máquina CNC utilizada**, dado que cada máquina CNC utiliza ferramentas específicas e, por isso, é importante saber quais as ferramentas disponíveis para cada tipo de maquinação e se a máquina permite o curso e potência necessários para as operações necessárias.

**O material da peça a maquinar**, tem influência no caso de realizar a fresagem de um metal duro com uma fresa de aço rápido com um diâmetro pequeno, é quase certo que a fresa vai partir ou pelo menos sofrer desgaste. Mas se a peça a maquinar for em plástico, as forças de corte já vão ser mais pequenas e já não haverá um risco tão elevado da quebra da ferramenta.

**Tipo de operações de maquinação a realizar**, visto que para uma operação de desbaste numa dada peça, o esforço de corte exercido numa ferramenta pode provocar a quebra da mesma. Mas para a mesma peça, se estivermos a realizar uma operação de acabamento essa mesma ferramenta pode ser uma boa solução.

**A qualidade da ferramenta**, que caracteriza a resistência da ferramenta às operações de maquinação sem sofrer elevadas deformações ou quebra.

**O desgaste da ferramenta**, dado que ferramenta com desgaste não possui a mesma performance e precisão de uma nova, mas poderá ser ainda reutilizada para operações de desbaste, onde a precisão é menos exigente.

**A precisão e tolerâncias da superfície a obter**, uma vez que para obter um bom acabamento e garantir uma boa precisão, é de boa prática recorrer a ferramentas novas ou com desgaste mínimo próprias para operação de acabamento, de maneira a garantir a melhor qualidade possível da superfície a maquinar.

**Utilização de ferramentas normalizadas** sempre que possível, dado que são mais fáceis de adquirir, permitem uma montagem mais fácil, uma vez que os sistemas já estão adaptados para elas, e garantem uma manutenção mais simplificada.

**Selecionar ferramentas diferentes para o desbaste e acabamento**, porque assim garante-se uma melhor qualidade de acabamento superficial.

**Quantidade de operações a ser realizadas sem troca de ferramenta**, para permitir a simplificação da programação, preparação da CNC e diminuição do tempo de maquinação. Para isso a ferramenta deve efetuar o máximo de operações sequenciais (sem troca de ferramenta) que lhe sejam permitidas.

**O tipo de lubrificação usada**, dado que em certas operações, as ferramentas têm tendência a aquecer devido à fricção com a peça. Ao aquecer existe o risco da peça formada se agarrar e nessas circunstâncias o desgaste da ferramenta é mais rápido.

Por isso são usados lubrificantes, para diminuir o atrito entre a ferramenta e peça e para diminuir a temperatura da ferramenta, mas nem todos os tipos de lubrificação são recomendados para todas as ferramentas. Por exemplo, embora a lubrificação com água misturada com óleo arrefecer a fresa de pastilhas, mas também cria um efeito de desgaste maior das pastilhas.

**O tipo de refrigeração**, também relacionado com a lubrificação, já que permite o arrefecimento da ferramenta melhorando a sua performance. Algumas ferramentas também permitem a refrigeração interna por via de canais internos no cone e na fresa, o que proporciona um arrefecimento mais rápido.

Na maior parte dos casos o líquido de refrigeração serve também com lubrificante para o processo de maquinação e em certas operações é utilizado o ar apenas como meio de refrigeração.

#### 4.7. Limitações dimensionais, geométricas e tecnológicas associadas à maquinagem

Também existem algumas limitações de fabrico inerentes à própria peça que devem ser tidas em consideração, pois podem significar a impossibilidade de maquinagem de uma peça com uso de uma determinada sequência de operações.

Estas limitações são geralmente [28] [57]:

- **Planeza**
  - Se uma face pede uma planeza inferior a outra paralela, devemos primeiro maquinar a face paralela e só depois a face toleranciada para garantir mais precisão da maquinagem.
- **Perpendicularidade**
  - Se uma face tem uma tolerância de perpendicularidade em relação a uma outra, devemos maquinar a 2ª face e depois a face toleranciada.
- **Fragilidade da Operação**
  - Devemos evitar realizar operações que fragilizem a peça e influenciem uma operação posterior.
  - No caso do torneamento é preferível começar por maquinar os diâmetros exteriores maiores e mais longe da face de apoio uma vez que garantimos que temos a maior quantidade de material possível de forma a maximizar a rigidez da peça.
- **Desvios da Ferramenta**
  - Se existem 2 furos concêntricos, mas em duas faces diferentes é preferível furar a peça totalmente e depois realizar o rasgo entre faces, de modo a evitar desvios
  - Esta prática, não é muito usual uma vez que com as brocas auto-centrantes de metal duro os desvios são minimizados, e por estratégia de maquinagem os furos são usualmente a ultima operação a ser efetuada.

Também existem limitações associadas aos próprios parâmetros de maquinagem (**tabela 9**), uma vez que o mau dimensionamento dos mesmo pode se traduzir em defeitos na maquinagem.

**Tabela 9 - Limitações tecnológicas da maquinagem**

Parâmetro de Maquinagem	Velocidade	Consequência
Avanço e Penetração	Alta	Desgaste da Cratera
	Baixa	Retorno Elástico
Velocidade de Corte	Alta	Desgaste por Difusão
	Baixa	Arestas Postiças de Corte

#### 4.8. Definição de sequência de maquinagem

A Sequência de maquinagem é geralmente utilizada para a definição do processo de maquinagem para peças produzidas em série, e é constituído por [28] [55]:

- Projeto de sequência de maquinagem
- Esquema de Simulação da maquinagem (cadeia de cotas)
- Protótipos de validação da sequência
- Ficha de Fase
- Ficha de Instruções detalhadas (facultativo)

A **ficha de fase** é um documento elaborado pelo autor da sequência de maquinagem, para servir como guia para o operador ou operadores responsáveis pela maquinagem da peça em questão e é o mais importante da lista acima mencionada, a par da sequência de maquinagem.

Enquanto a sequência de maquinagem é um “resumo” das etapas do processo de execução, organizadas de uma forma lógica que possibilita o fabrico da peça, a ficha de fase é o documento onde está

contida toda a informação necessária para maquinação de uma fase específica e o conjunto das fichas de fase traduzem na totalidade a sequência de maquinação definida.

A ficha de fase deve conter:

- As informações relativas à fase
  - Tipo de maquinação, número de fase, Tipo de máquina, dispositivo de posicionamento;
- As informações relativas à peça
  - Material, nome, desenho da peça após a fase atual;
- As informações relativas às operações a realizar
  - Natureza da operação, cotas de fabrico, tolerâncias;
- Dados/Parâmetros de corte
  - Velocidade de corte, avanços, velocidade de rotação;
- Dados das ferramentas de corte
  - Características da ferramenta;
- Ferramenta de controlo
  - Para cada operação de acabamento.

Como podemos verificar, o processo da elaboração de uma sequência de maquinação é moroso e pode ter que ser corrigido múltiplas vezes.

Por isso, nos dias atuais muitas empresas estão a adotar uma abordagem mais iterativa (operador/produto final) para produção unitária e mesmo pequenas séries, evitando assim a elaboração de documentos informativos sobre a maquinação, sendo que os dados são guardados no programa CAD/CAM elaborado.

Mas, para uma produção de uma série elevada de peças, é importante realizar um estudo prévio das operações a executar, de modo a reduzir os custos e otimizar o processo de maquinação para uma determinada peça.



## 5. Casos de Estudo

É importante salientar que os casos de estudos foram realizados mediante as práticas da empresa, sendo que esta se socorre muito da experiência e conhecimento prático dos operadores como suporte de toda a produção. Como são pequenas séries nem sempre o caminho mais rápido passa pelo estudo da peça a maquinar, sendo esta feita muitas vezes por processos de tentativa erro. Este caminho é por vezes preferível uma vez que garante tempos de produção mais curtos e resultados dentro dos parâmetros do cliente, embora não seja um processo otimizado.

Os colaboradores trabalham num processo de aquisição de conhecimento a nível diário e com esse conhecimento e experiência partem para uma melhoria contínua profissional.

Para efeitos académicos e facilidade de compreensão e organização, os casos de estudo utilizam algumas ferramentas que têm a finalidade de sistematizar a organização dos processos de maquinação utilizados.

### 5.1. Controlo Dimensional de uma peça prismática simples

#### 5.1.1. Introdução

Este caso de estudo refere ao primeiro trabalho efetuado e documentado no âmbito do estágio realizado na Fernando Ferro & Irmão, do qual se elabora a seguinte descrição e discussão de resultados.

Os relatórios gerados datam 24 de fevereiro de 2017, 2 semanas após o começo do estágio.

Como qualquer estudo dimensional efetuado, o principal objetivo é verificar a conformidade da peça maquinada com os requisitos dimensionais requeridos pela empresa.

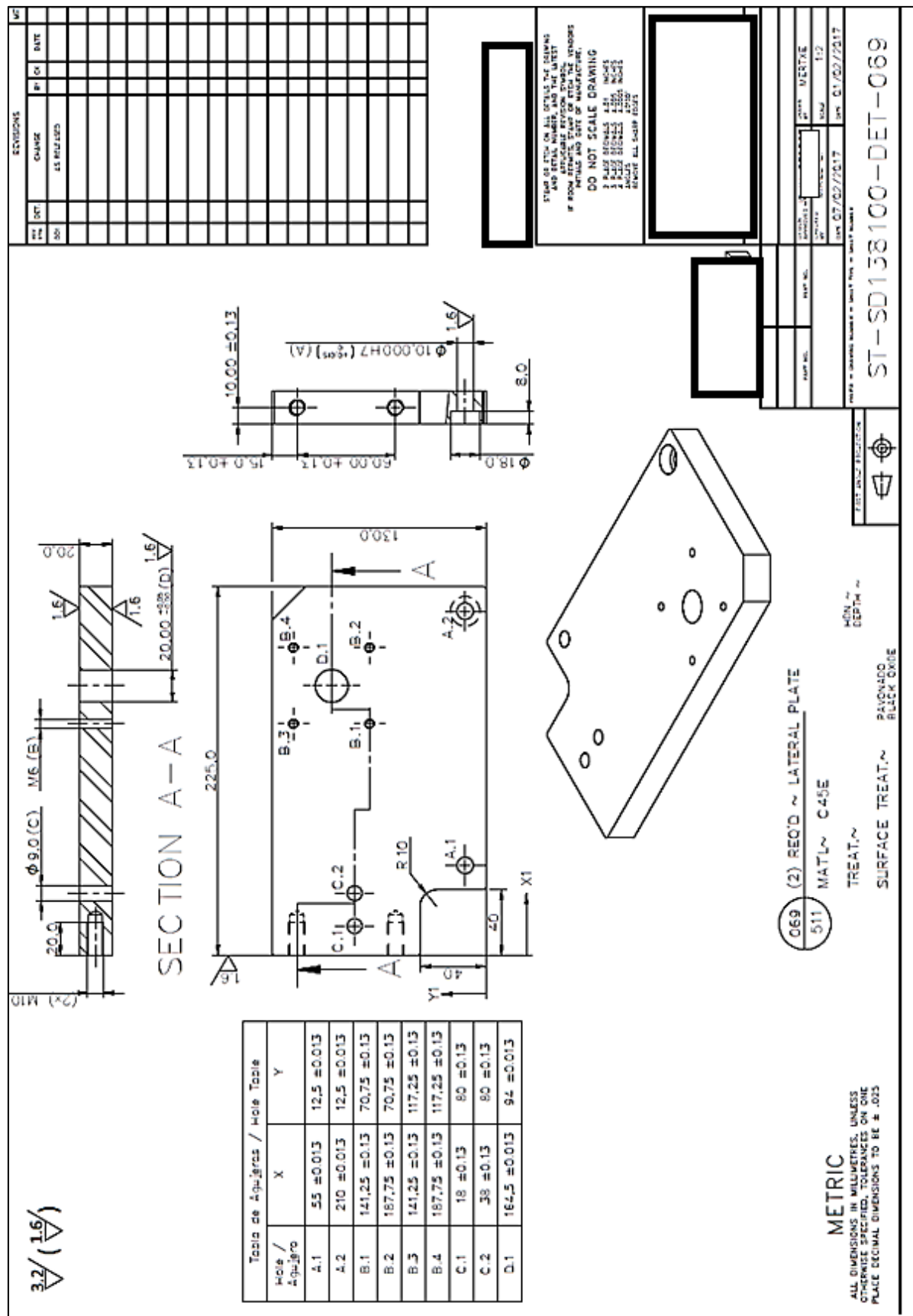
Também tem o objetivo de demonstrar quais as valências adquiridas até à data e demonstrar o uso de uma máquina de mediação por coordenadas (CMM) para o controlo e validação de uma peça maquinada por CNC.

#### 5.1.2. Metodologia

A peça proposta a controlar é uma peça prismática simples que foi realizada numa fresadora CNC de 3 eixos.

Para efetuar a medição de uma peça com uso de uma CMM é necessário realizar o **alinhamento** da mesma, que é um passo de suma importância para a utilização de uma CMM. A localização e orientação da peça no espaço real é efetuada através do alinhamento que se indica ao *software*, permitindo posteriormente a medição automática recorrendo ao modelo CAD 3D

Como esta peça tem um referencial representado do desenho técnico (**figura 59**), é boa prática fazer o alinhamento utilizando esse mesmo referencial.



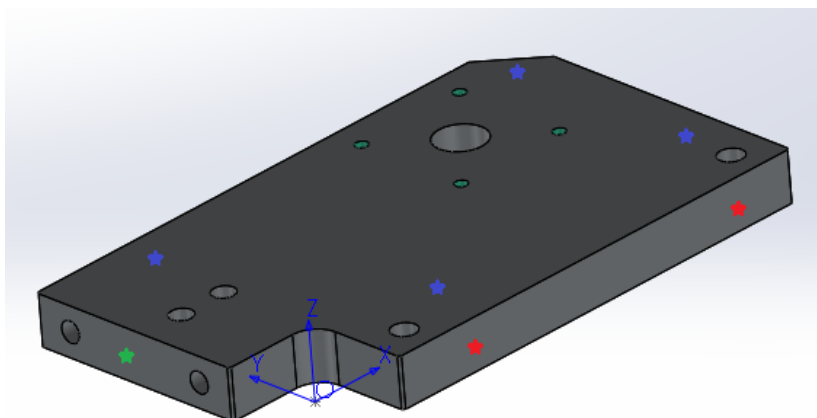
**Figura 59 - Desenho Técnico Caso estudo 1**



Para o alinhamento desta peça utilizou-se o método mais simples, Plano-Linha-Ponto, que consiste em:

1. Tirar um plano que irá corresponder ao nosso plano virtual XoY e origem em Z.
2. Tirar uma linha que irá representar a orientação do eixo X virtual e origem do eixo Y;
3. Tirar um ponto que vai corresponder à origem de X virtual.

Assim, a máquina CMM permite tirar pontos manualmente (**figura60**), com o auxílio de um joystick. Pontos esses que serão depois interpolados pela máquina que, por sua vez, irá escolher qual a forma geométrica que representa o conjunto desses pontos.



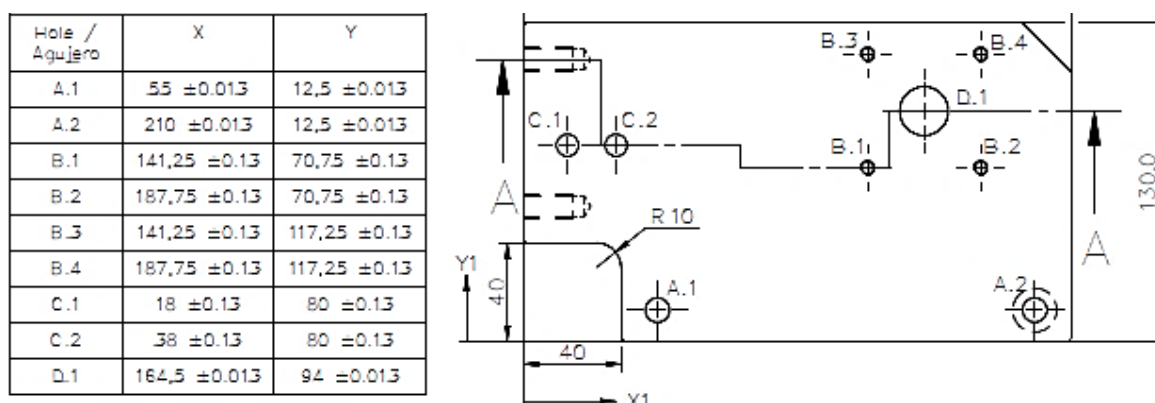
**Figura 60 - Representação dos pontos do alinhamento inicial**

Os quatro pontos a azul correspondem a pontos tirados pela máquina e juntos vão representar um plano.

O mesmo ocorre para os 2 pontos a vermelho que vão representar uma linha e o ponto a verde que vai representar apenas um ponto.

Após os pontos obtidos e o alinhamento feito, então a nossa peça encontra-se referenciada. Isto permite-nos utilizar o modelo CAD para escolher quais os elementos que a máquina irá medir e como os vai medir em modo completamente automático.

Neste caso específico, os elementos que queremos controlar são a **localização e diâmetro dos furos da peça (figura 61)**, uma vez que apresentam tolerâncias mais apertadas que não poderiam ser verificadas facilmente com os meios convencionais.



**Figura 61 - Cotas e Localização dos Furos da peça do caso de estudo 1**

### 5.1.3. Resultados

Os resultados obtidos são demonstrados diretamente num relatório padrão (**tabela 10**), que o *software* permite.

Este relatório tem acima de cada medição nome do elemento medido, que, neste caso, corresponde às referências dos furos (**figura 61**).

**Tabela 10 - Relatório dimensional gerado para o caso de estudo 1**

pcdmis		PART NAME : st-sd138100-det-069					febrero 24, 2017	15:22
		REV NUMBER :		SER NUMBER :		STATS COUNT : 1		
⊕	MM	LOC1 - CIRA.1						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	55.000	0.013	-0.013	55.054	0.054	0.041		
Y	12.500	0.013	-0.013	12.533	0.033	0.020		
D	10.000	0.015	0.000	10.034	0.034	0.019		
⊕	MM	LOC2 - CIRA.2						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	210.000	0.013	-0.013	210.035	0.035	0.022		
Y	12.500	0.013	-0.013	12.557	0.057	0.044		
D	10.000	0.015	0.000	10.048	0.048	0.033		
⊕	MM	LOC3 - CIRB.1						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	141.250	0.013	-0.013	141.288	0.038	0.025		
Y	70.750	0.013	-0.013	70.829	0.079	0.066		
D	4.917	0.050	-0.050	4.944	0.027	0.000		
⊕	MM	LOC4 - CIRB.2						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	187.750	0.013	-0.013	187.781	0.031	0.018		
Y	70.750	0.013	-0.013	70.811	0.061	0.048		
D	4.917	0.050	-0.050	4.924	0.007	0.000		
⊕	MM	LOC5 - CIRB.3						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	141.250	0.013	-0.013	141.287	0.037	0.024		
Y	117.250	0.013	-0.013	117.336	0.086	0.073		
D	4.917	0.050	-0.050	4.944	0.027	0.000		
⊕	MM	LOC6 - CIRB.4						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	187.750	0.013	-0.013	187.782	0.032	0.019		
Y	117.250	0.013	-0.013	117.313	0.063	0.050		
D	4.917	0.050	-0.050	4.918	0.001	0.000		
⊕	MM	LOC7 - CIRC.1						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	18.000	0.013	-0.013	18.039	0.039	0.026		
Y	80.000	0.013	-0.013	80.067	0.067	0.054		
D	9.000	0.050	-0.050	8.958	-0.042	0.000		
⊕	MM	LOC8 - CIRC.2						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	38.000	0.013	-0.013	38.063	0.063	0.050		
Y	80.000	0.013	-0.013	80.055	0.055	0.042		
D	9.000	0.050	-0.050	8.975	-0.025	0.000		
⊕	MM	LOC9 - CIRD.1						
AX	NOMINAL	+TOL	-TOL	MEAS	DEV	OUTTOL		
X	164.500	0.013	-0.013	164.530	0.030	0.017		
Y	94.000	0.013	-0.013	94.061	0.061	0.048		
D	20.000	0.050	0.000	20.046	0.046	0.000		

Para facilitar a interpretação da tabela anterior, em seguida é apresentada uma explicação rápida do cabeçalho da mesma.

**NOMINAL** – valor da cota nominal a ser controlada.

**+TOL/-TOL** – intervalo de tolerância permitido pelo cliente.

**MEAS** – valor exato medido pela CMM.

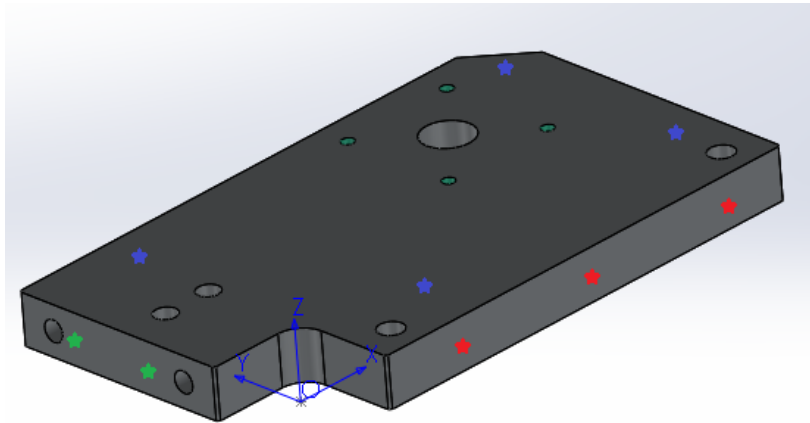
**DEV** – diferença entre o valor nominal e o valor medido.

**OUTTOL** – diferença entre o valor medido e o limite da tolerância.

Como os resultados obtidos não estão dentro das tolerâncias, decidiu-se fazer uma segunda medição para verificar a medição anterior utilizando um novo alinhamento.

Este novo alinhamento consiste em dar mais pontos para a interpolação dos elementos de alinhamento, de maneira a obter resultados mais precisos:

1. 4 pontos correspondentes a XoY e origem em Z
2. 3 pontos que serão a direção de X e origem em Y
3. 2 ponto que vai corresponder à origem de X virtual.



**Figura 62 - Segundo alinhamento**

Os resultados com este novo alinhamento continuam a estar fora da tolerância (**figura 63**), e como tal temos que dar esta peça como não-conforme, dado que não cumpre os requisitos exigidos pelo cliente.

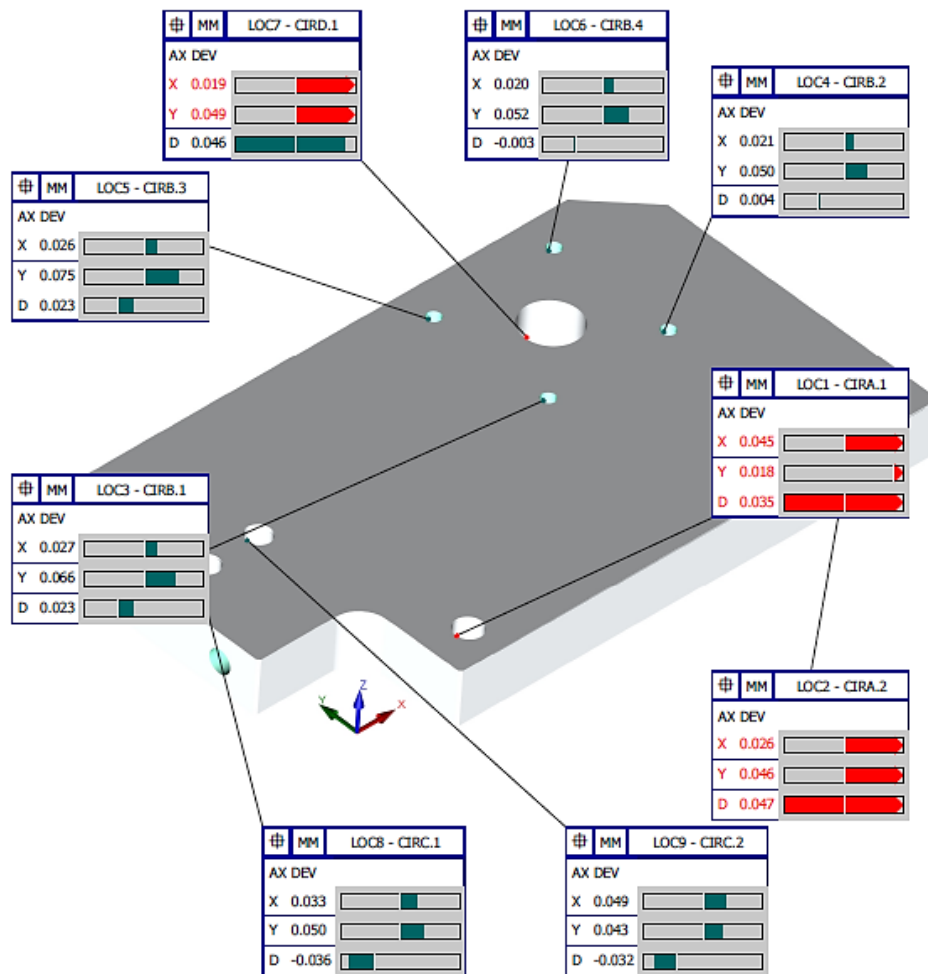


Figura 63 - Segundas medições com perspectiva 3D

#### 5.1.4. Conclusão

Pela análise e confirmação dos valores anteriores, considera-se a que a peça não cumpre os requisitos do cliente.

O responsável da metrologia da empresa, foi informado desta situação, procedendo a reconfirmação dos valores, recorrendo a um alinhamento da peça ao centro, uma vez que os operadores CNC normalmente referenciam a peça ao centro para a sua maquinação.

Depois dos valores reconfirmados, foi aberta uma ficha de não conformidade para apurar quais as causas dos erros de maquinação, assim como a identificação do operador que maquinou a peça.

A causa dos erros associados à maquinação foi um mau posicionamento e possível aperto deficiente da peça que influenciou toda a maquinação.

Foi necessário a realização de uma nova peça, desta vez com maior atenção ao posicionamento e aperto da peça de modo a garantir a conformidade da mesma.

Os objetivos deste caso de estudo foram obtidos, uma vez que se apresenta o procedimento geral na medição com uso de uma CMM e evitou-se o envio de uma peça “defeituosa” para o cliente.

Uma grande percentagem das peças não conformes na empresa, são peças simples onde os erros são maioritariamente humanos.

## 5.2. Controlo Dimensional de uma peça complexa

### 5.2.1. Introdução

As potencialidades da CMM são imensas e as vantagens que traz permitem uma diminuição dos tempos de medição especialmente de peças com geometrias complexas e com tolerâncias da localização de determinados elementos em relação a uma referência, além das precisões elevadas que permite.

Este caso de estudo tem a finalidade de representar e evidenciar essas vantagens associadas na medição de uma peça complexa (**Figura 64**), a qual se teria muita dificuldade de verificar recorrendo aos métodos de medição e controlo convencionais, recorrendo a uma CMM de 3 eixos.

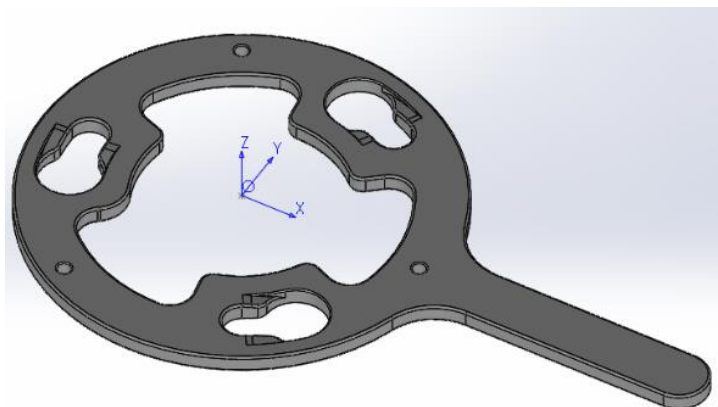


Figura 64 - Modelo 3D da peça complexa

### 5.2.2. Metodologia

Esta peça já apresenta vários desafios devido à sua complexidade (**figura 65**), e mesmo antes da sua medição e como a peça tem uma espessura muito pequena e pouco peso é importante ter em conta dois fatores importantes:

- **Qual a ponteira de medição a utilizar**, de maneira a facilitar a obtenção dos pontos e evitar possíveis colisões com a mesa da CMM, devido à espessura reduzida da peça;
- **Qual o método para fixar a peça**, uma vez que, embora as forças exercidas pelo toque da ponteira de apalpação representem valores mínimos, ainda poderão movimentar a peça se a fixação não for bem efetuada e influenciar os resultados obtidos.
  - Também é necessário cuidado com a fixação para garantir que os elementos de fixação não vão comprometer as medições a serem realizadas.

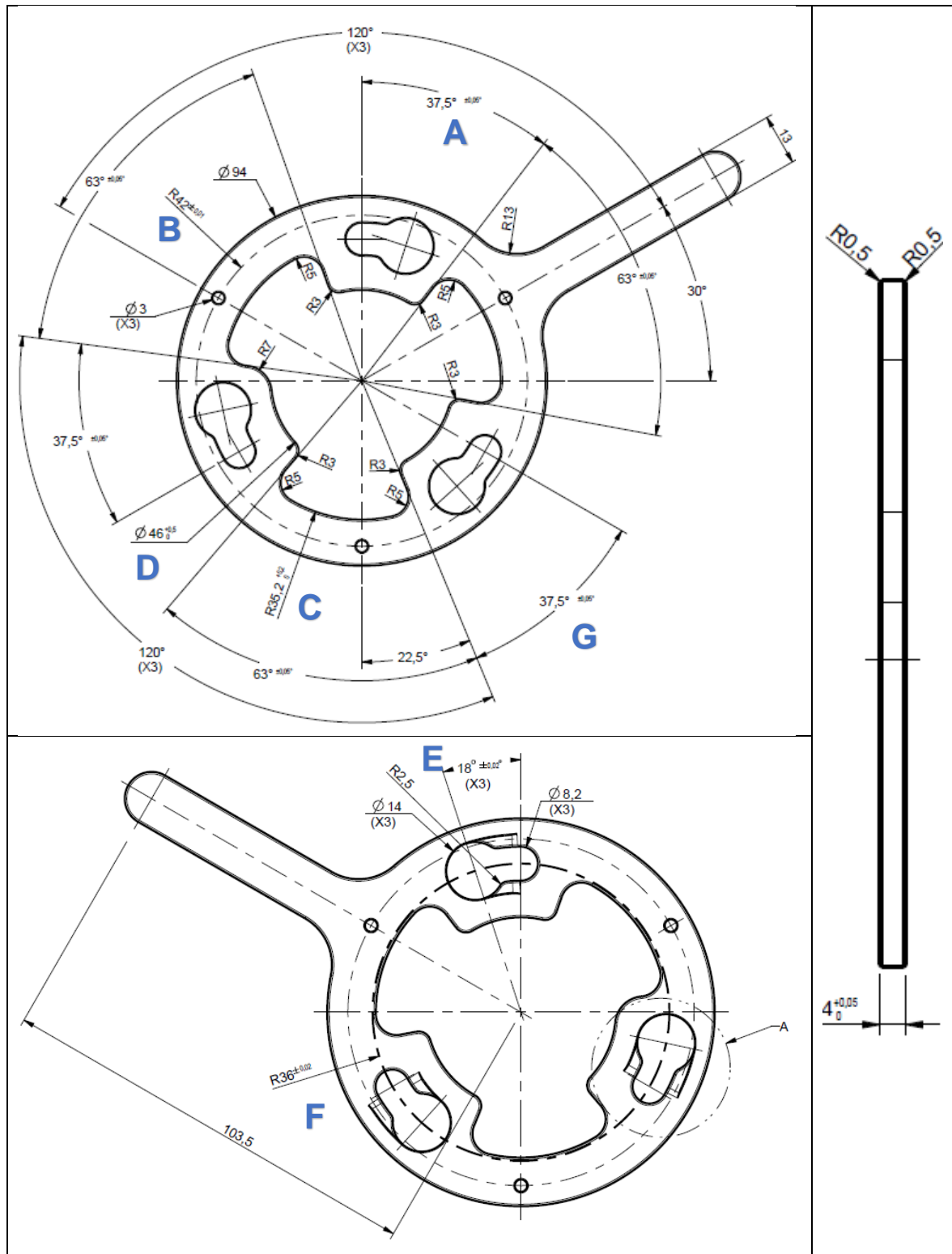
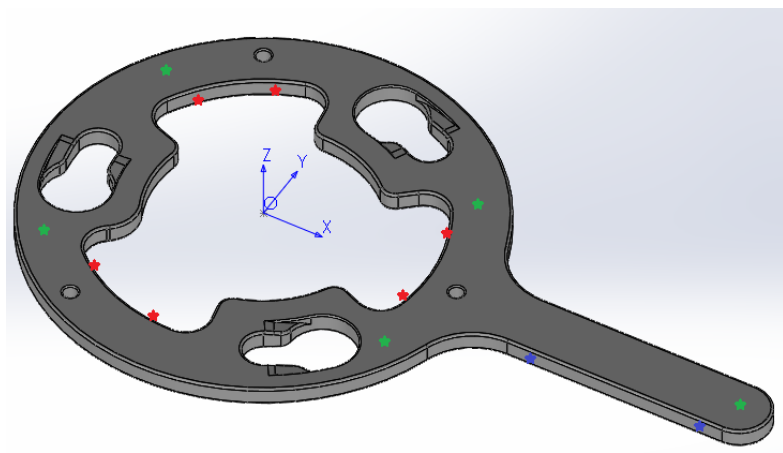


Figura 65 - Desenho de definição do caso de estudo 2



Com estes fatores em mente utiliza-se plasticina em pontos específicos da peça, para garantir a fixação sem causar interferências na medição e o seguinte método de alinhamento (**figura 66**):

- 5 Pontos na face superior para tirar um plano para origem de Z (verde)
- 2 pontos para representar a orientação de X (azul)
- 5/6 pontos ao longo do furo para obter o seu centro e utilizar como origem de X e Y (vermelho)
  - Sendo que o furo a utilizar deve ser o com tolerância mais apertada.



**Figura 66 - Alinhamento do caso de estudo 2**

Para tirar os pontos, usados no alinhamento da peça e também as restantes medições em automático, utilizou-se a ponteira de toque com diâmetro mais pequeno disponível de 1mm que permite efetuar as medições evitando colisões com a mesa. Esta escolha também se deve ao facto de ser uma peça com tolerâncias muito apertadas que podiam ser comprometidas na medição através do sistema de visão disponível na CMM.

É intuitivo concluir que para a medição de uma peça complexa também implica um alinhamento mais complexo de forma a orientar e posicionar a peça de forma mais favorável e correta, permitindo posteriormente a medição automática com recursos ao modelo 3D.

Para realizar o controlo da peça foram efetuadas medições das características representadas na **figura 65**, de maneira a poder verificar a conformidade da maquinação realizada com os requisitos dimensionais e geométricos pedidos pelo cliente.

### 5.2.3. Resultados

Para apresentar os resultados da medição obtida, utiliza-se um tipo de relatório gerado que inclui a representação da peça e dos elementos medidos num modelo 3D, que pretende simplificar a visualização e compreensão dos valores obtidos.

Por exemplo as linhas 2 e 8 representadas na **figura 67**, foram criadas a partir do ponto central “circunferência 11” e de pontos tirados entre a face interior da peça e o centro da semicircunferência mais pequena do entalhe. Depois de obtidas as linhas mediu-se o ângulo (**A**) que faziam entre si, conforme as tolerâncias pedidas pela o cliente.

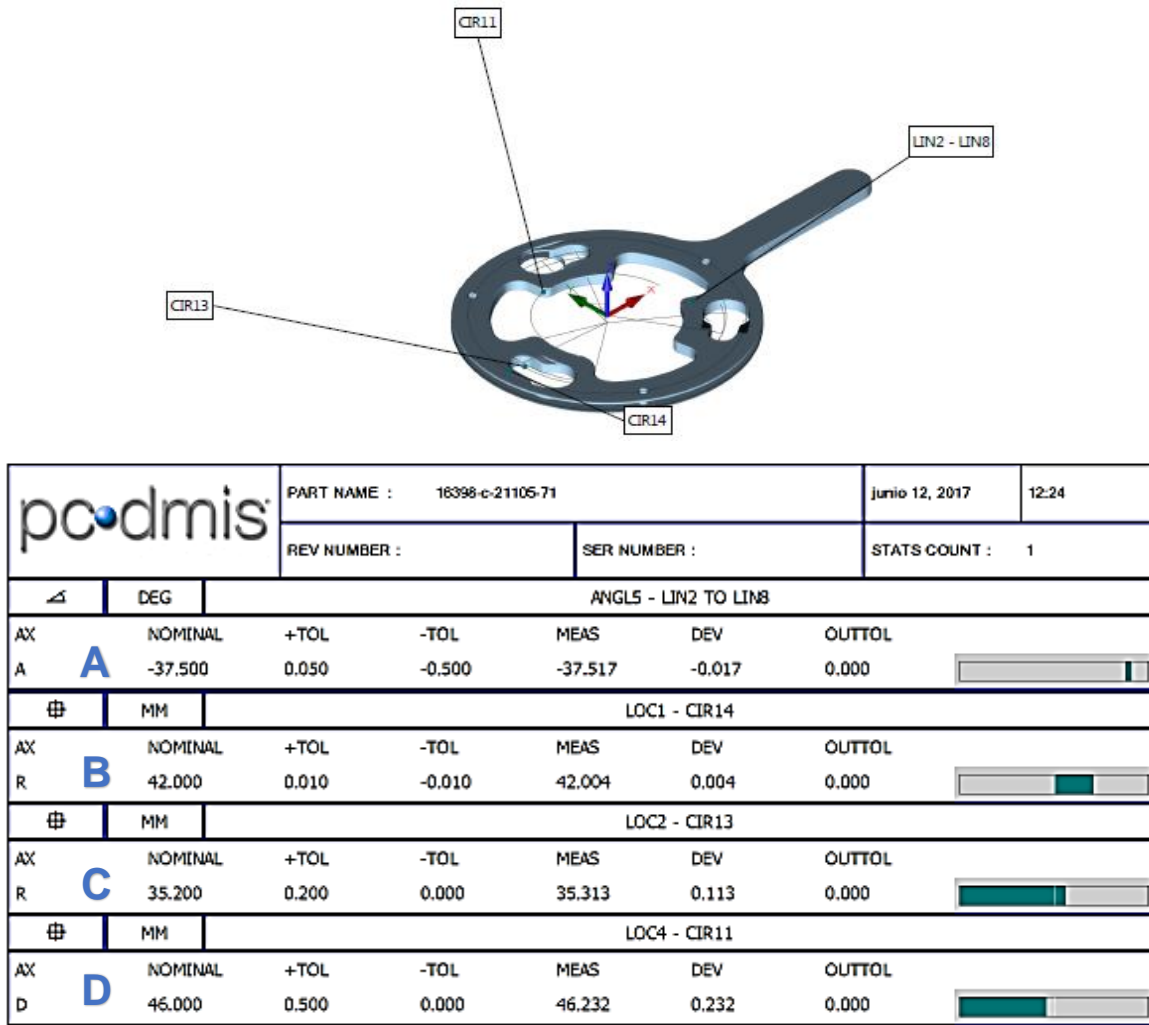


Figura 67 - Resultados da medição por CMM do caso 2 (1)

Na **figura 68** estão representadas as medições referentes à circunferência (**F**) que passa pelos centros das circunferências dos entalhes.

O ângulo entre os centros das circunferências dos entalhes também é medido pelo ângulo entre a linha 4 e 6 (**E**), que são obtidas através dos pontos centrais dos furos do entalhe e da circunferência central.

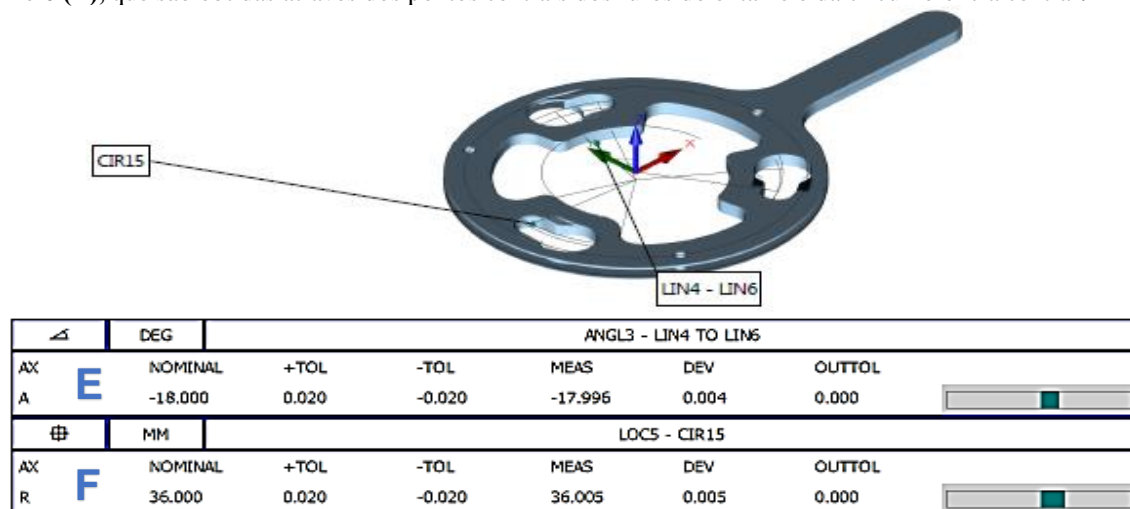
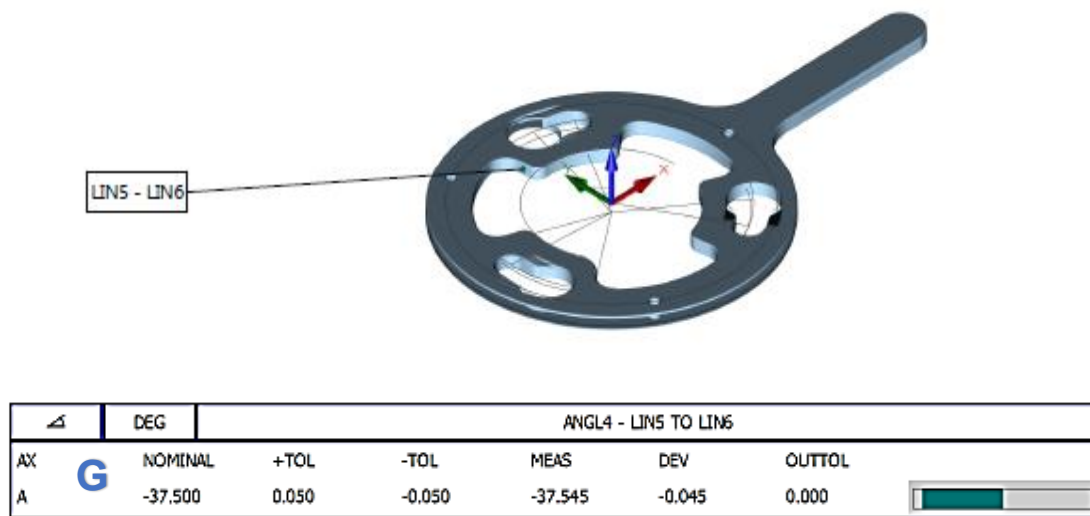


Figura 68 - Resultados da medição por CMM do caso 2 (2)

Ainda realizamos uma nova medida de um elemento semelhante ao (A), dado que os elementos necessários para a sua verificação já tinham sido tirados para as medidas anteriores e assim era possível realizar esta medição extra sem esforço adicional (**figura 69**).



**Figura 69 - Resultados da medição por CMM do caso 2 (3)**

Outras medições menos complexas (como a espessura), mesmo que toleranciadas devem ser medidas recorrendo aos meios convencionais para aumentar o tempo disponível das CMM em caso necessidade de verificação de uma peça complexa com urgência.

Neste caso a espessura foi medida com micrómetro, que garante uma medição suficientemente rigorosa e mais rápida em comparação com a realização de uma nova medição na CMM e o valor obtido foi de 4.022mm que está dentro do intervalo de tolerâncias.

#### 5.2.4. Conclusão

Como todos os resultados obtidos estão em conformidade com as tolerâncias pedidas no desenho, então procede-se à aprovação da peça e envio para o cliente.

Este caso foi mais desafiante, devido aos inúmeros cuidados a ter com a programação para obter resultados fidedignos e assegurar que em nenhum momento da medição em modo automático a ponteira corria o risco de colisão com a peça, bancada de trabalho ou elementos de fixação. O principal desafio foi a medição dos ângulos.

Em contraste com o caso anterior, por ser uma peça de maior complexidade, “obriga” a um maior rigor e exigência pelo operador CNC.

Também a experiência adquirida ao longo dos meses de estágio, dedicados à área da metrologia, principalmente às CMM, torna com que os resultados finais sejam os mais precisos e rápidos de obter, de uma forma mais segura e variada, sempre assegurando o rigor e veracidade nas medições realizadas.

### 5.3. Maquinagem a 3 eixos e Controlo Dimensional

#### 5.3.1. Introdução

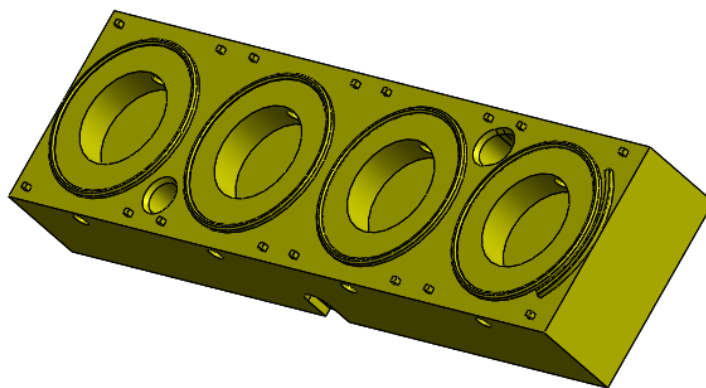
Esta peça foi realizada após um tempo de aprendizagem do *software* Depocam e do centro de maquinagem CNC Doosan DNM 650 e pretende demonstrar os conhecimentos adquiridos com a realização das peças maquinadas durante o tempo de aprendizagem.

Este caso de estudo foi acompanhado por um operador CNC da empresa uma vez que o material da peça nunca tinha sido maquinado anteriormente na fábrica e, consequentemente, o cuidado a ter com os parâmetros da maquinação foram acrescidos.

Os principais objetivos deste projeto foram o fabrico de uma peça que representativa da realidade diária da fábrica, realizando todo o processo de maquinação de uma peça prismática e sua verificação dimensional e geométrica recorrendo aos meios de medição disponíveis em chão de fábrica e da tecnologia CMM presente no laboratório de metrologia.

### 5.3.2. Preparação da produção

Pretende-se maquinar duas peças (**figura 70**) com a referência P1612285 em Bronze UA 9 NFE e o bruto disponibilizado foi previamente encomendado pelo gabinete de produção e a sobre espessura foi verificada e considerada suficiente para realizar a maquinação e as suas dimensões são 285x78x52mm.



**Figura 70 - Modelo 3D da peça do caso de estudo3**

A **peça é prismática**, portanto a maquinação deve ser efetuada num centro de maquinação CNC e a máquina escolhida foi a CNC de 3 eixos Doosan DNM 650. Esta escolha deve-se a:

- Disponibilidade da máquina;
- Não existem vantagens significantes para recorrer à maquinação a 5 eixos, uma vez que:
  - Pequena série;
  - Peça complexa e material desconhecido (para o operador) levam à necessidade de controlo dimensional o longo da maquinação e consequente necessidade de realizar vários apertos;
- Para garantir as tolerâncias de planicidade na maquinação a 5 eixos era necessário estruturar o bruto e pelo menos 2 apertos diferentes;
- Custos da peça final seriam muito maiores no caso da maquinação de 5 eixos e, embora seja uma peça complexa, não apresenta geometrias que em que seja necessário a maquinação 5 eixos;

Após o estudo do modelo 3D e do desenho de definição da peça em questão (**figura71**) foi realizado uma **pré-sequência de maquinação**, enumerada abaixo, para dar um seguimento lógico ao processo de maquinação:

- 1) Estruturar faces laterais e desbaste da face superior e caixas para aliviar tensões do material;
    - a. Convencional para retirar a sobre espessura devido ao aperto;
  - 2) Maquinação da primeira face Lateral;
  - 3) Maquinação da segunda face lateral;
  - 4) Maquinação da face Inferior;
  - 5) Maquinação e acabamento da face Superior;
- I. Verificação das dimensões recorrendo a equipamentos de medição e CMM.

Em seguida, é necessário preparar a máquina e as ferramentas a ser utilizadas para evitar paragens durante a maquinação da peça.

Para isso é necessário limpar o espaço de trabalho da máquina para retirar todas as rebarbas de processos anteriores que possam ter influência na maquinação. Também deve-se realizar um estudo das ferramentas a serem utilizadas tendo em conta os passos de maquinação anteriormente determinados.

Este estudo é representado na sequência de maquinação demonstrado de seguida.

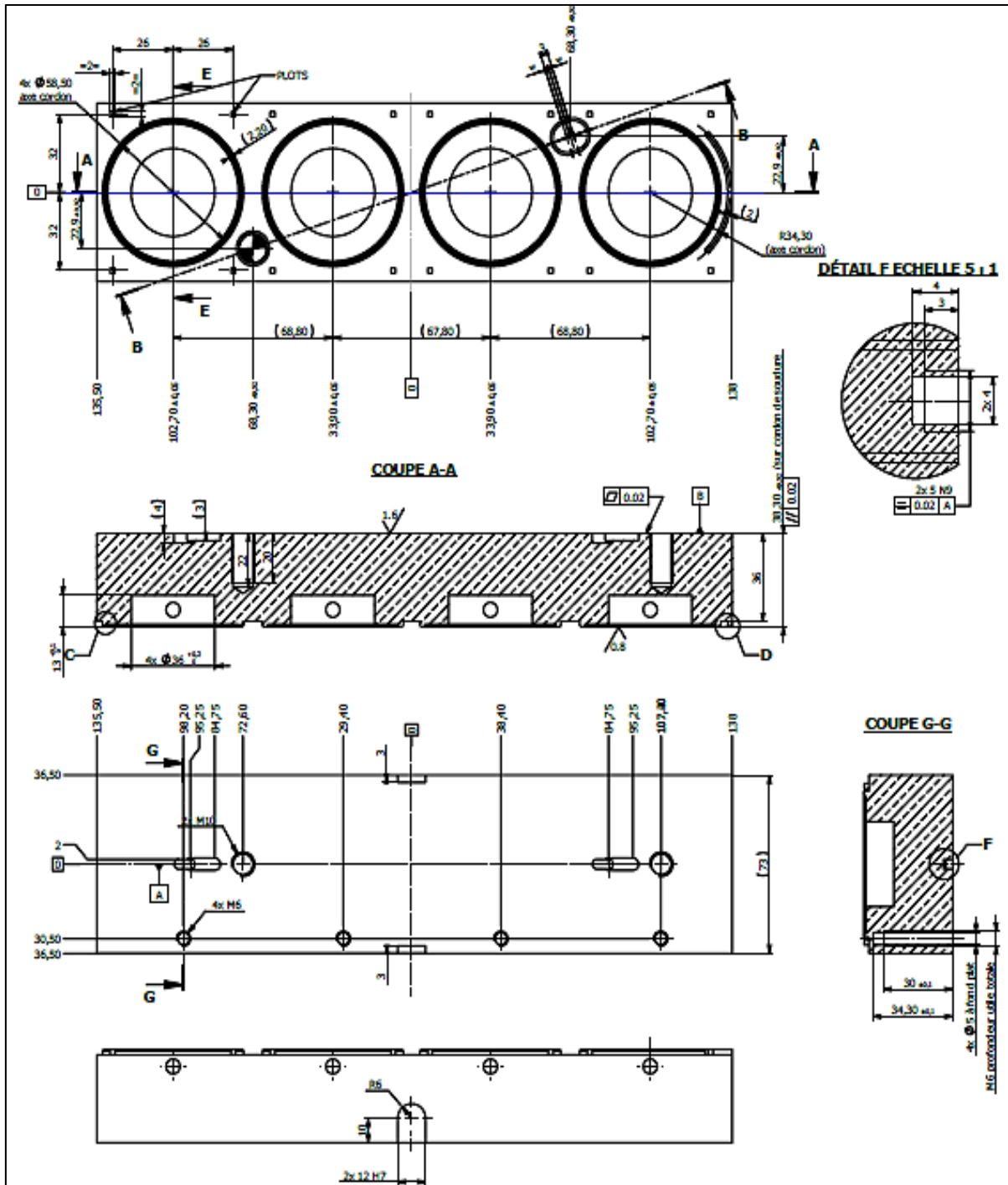


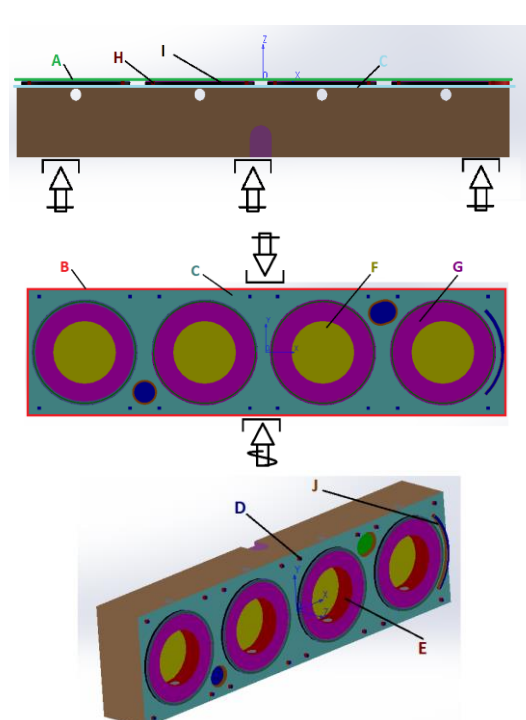
Figura 71 – Excerto do desenho técnico do caso de estudo 3 (Anexo2)

### 5.3.3. Maquinagem

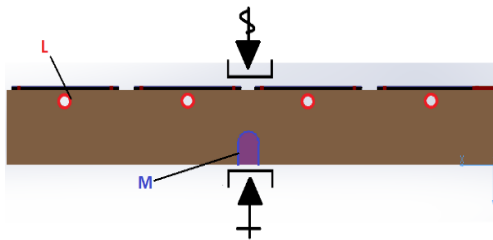
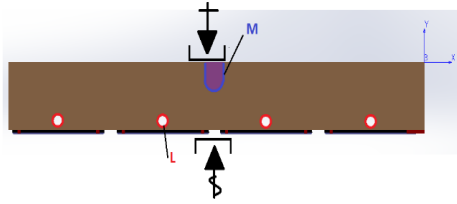
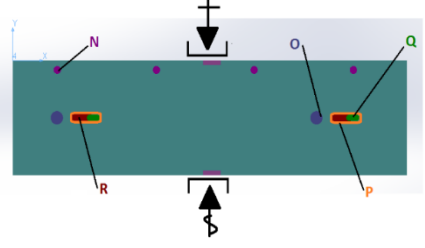
A maquinagem efetuada da empresa é essencialmente focada no processo de programação CAD/CAM e na maquinagem CNC, e não existem documentos que acompanham este processo além do desenho de definição da peça e do modelo 3D.

Para simplificar a compreensão dos trabalhos realizados e do pensamento lógico que foi aplicado à maquinagem da peça em questão, são apresentados dois documentos adicionais que não foram utilizados durante a maquinagem da peça, mas pretendem a sistematização e organização da maquinagem.

O primeiro documento é a **sequência de maquinagem**, desta vez já mais detalhada, onde representamos as divisões por fases, as operações principais a serem realizadas em cada uma das fases, as ferramentas mais adequadas para cada operação, o sistema de fixação utilizado em cada face e a superfície que deve ser maquinada em cada operação (representadas por letras). Como a peça é algo complexa, para facilitar a representação das superfícies utiliza-se um sistema de cores para uma leitura mais simples e rápida.

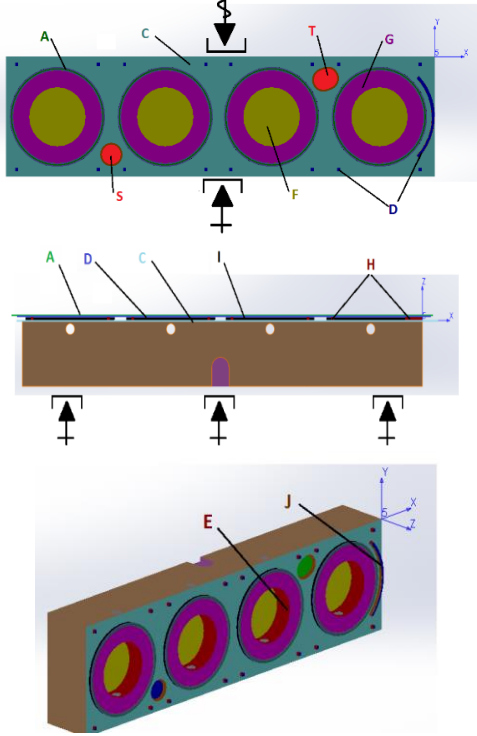
Sequência de Maquinagem		
Nome: P1612285	Material: Bronze UA 9 NFE	Data: 22/05/17
Responsável: Cláudio Neves		
Operações	Ferramentas	Desenho + Isostatismo
Fase 10		
Máquina: Fresadora CNC (Doosan DNM 650)		
Facejamento topo (debaste) de A e D	Fresa de pastilhas (roca)	
Desbaste Lateral de B	Fresa de pastilhas (roca)	
Desbaste de E, F e G	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste de C, H e I	Fresa 2 gumes metal duro	
Pré-acabamento Lateral de B	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento Lateral de B	Fresa 2 gumes metal duro	
Facejamento topo de A e D	Fresa 2 gumes metal duro	
Fase 15		
Máquina: Fresadora Convencional		
Facejamento topo (acabamento)	Roca (fresa de pastilhas)	Retirar sobre material

Elaboração da Sequência de Maquinagem (continuação)

Operações	Ferramentas	Desenho + Isostatismo
Fase 20		
Máquina: Fresadora CNC (Doosan DNM 650)		
Ponteamento de L	QBA	
Furação de L	Broca Helicoidal aço rápido	
Fresagem do furo L	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste (fresagem de rasgo) de M	Fresa 2 gumes metal duro	
Pré-acabamento topo e lateral de M	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento topo e lateral de M	Fresa 2 gumes metal duro	
Quebrar arestas de M	QBA	
Fase 30		
Máquina: Fresadora CNC (Doosan DNM 650)		
Ponteamento de L	QBA	
Furação de L	Broca Helicoidal aço rápido	
Fresagem do furo L	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste (fresagem de rasgo) de M	Fresa 2 gumes metal duro	
Pré-acabamento topo e lateral de M	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento topo e lateral de M	Fresa 2 gumes metal duro	
Quebrar arestas de M	QBA	
Fase 40		
Máquina: Fresadora CNC (Doosan DNM 650)		
Ponteamento de N e O	QBA	
Furação de O	Broca Helicoidal aço rápido	
Mandrilar O	Mandril aço rápido	
Furação de N	Broca Helicoidal aço rápido	
Desbaste (fresagem de rasgo) de P e Q	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento topo e lateral de P, Q e R	Fresa 2 gumes metal duro	
Quebrar arestas de R	QBA	
Escarear N e O	QBA	



## Elaboração da Sequência de Maquinagem (continuação)

Operações	Ferramentas	Desenho + Isostatismo
<b>Fase 50</b>		
<b>Máquina: Fresadora CNC (Doosan DNM 650)</b>		
Desbaste em Fresagem Plana de A e D	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste fresagem topo e lateral de E, F e G	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste fresagem topo e lateral de C, J, H e I	Fresa 2 gumes metal duro	
Ponteamento de S e T	QBA	
Furação de S e T	Broca Helicoidal aço rápido	
Escarear S e T	Fresa 2 gumes metal duro com raio de canto	
Acabamento em fresagem plana e D e G	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento em fresagem lateral de E	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento em fresagem plana de F	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento topo e lateral (furos) de S e T	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento Lateral de H e I	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento topo de C	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento topo e lateral (rasgo) de J	Fresa 2 gumes metal duro	
Fresagem de contorno de forma de A com I	Fresa 2 gumes metal duro com raio de canto	
Quebrar arestas de B, D, E e J	QBA	

O resultado final é um documento extenso devido à complexidade da peça maquinada e da quantidade de operações e fases realizadas.

O segundo documento é a **ficha de fase**, que consiste na elaboração de um documento para cada fase, que seja representativo de todas as variáveis associadas à fase de maquinagem em questão.

Como estamos perante cinco fases distintas, vamos elaborar cinco fichas de fase, abordando antes um pouco o processo de preparação da maquinagem realizados.

### Fase 10

O **sistema de fixação** escolhido para o aperto foi uma prensa mecânica com largura de 150mm com um curso total de 300mm. Foi escolhido tendo em conta a geometria da peça, mas também devido à disponibilidade da máquina a trabalhar, sendo perfeitamente adequado para os trabalhos.

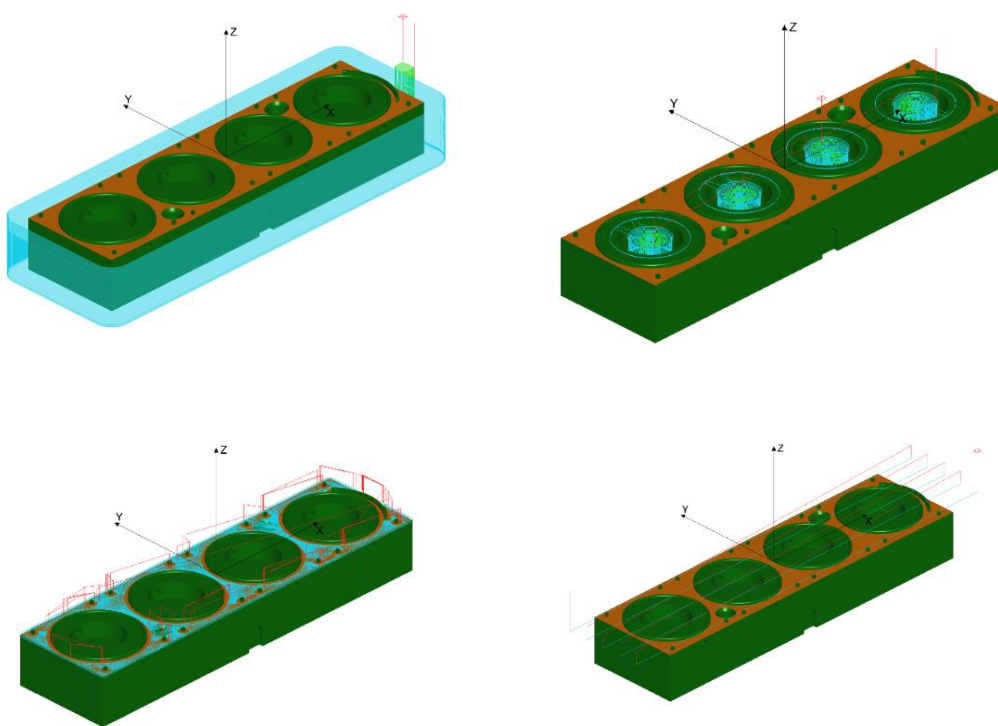
É ainda necessário **definir o ponto zero-peça para efetuar o posicionamento** da mesma. Como estamos a lidar com uma peça bruta com sobre-espessura tiramos o zero-peça ao centro, para ser possível maquinar todas as faces do bruto.

Para zerar a peça em Z, é necessário chamar a ferramenta de referência e leva-la até tocar na peça. Essa posição será a nossa origem de Z do nosso referencial-peça.

Nesta máquina, o processo de posicionar a peça ainda é algo antigo, recorrendo a uma ferramenta calibrada para tirar a posição em z e um centrador excêntrico para tirar a posição ao longo de x e y.

Como vamos centrar a peça temos que fazer 1 medição no Xmin e outra no Xmax para depois calcular o ponto intermédio que corresponderá à origem de X. O mesmo ocorre para a coordenada Y.

A **figura 72** representa algumas das operações simuladas em computador e que vão ser realizadas pela CNC para maquinar a peça.



**Figura 72 - Algumas operações efetuadas na Fase 10**

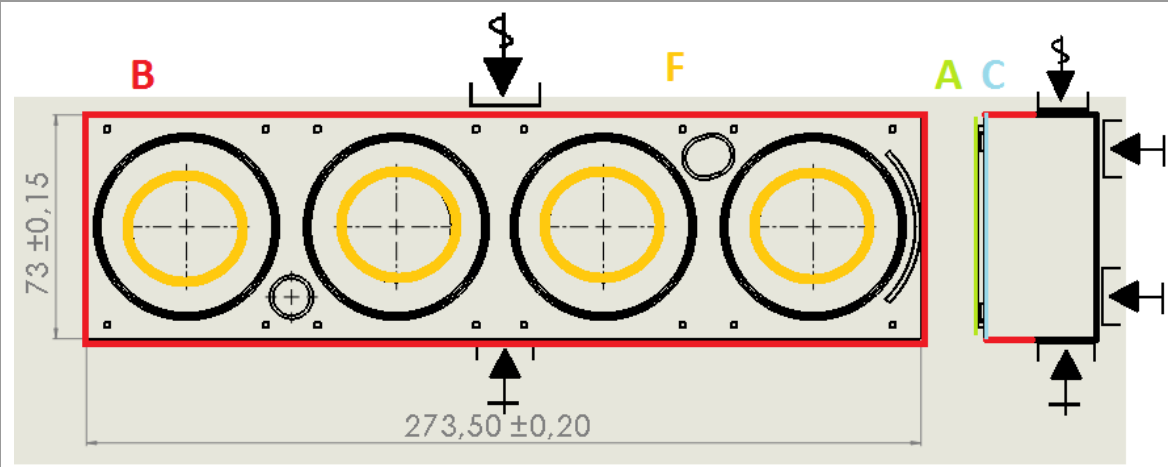
Em seguida apresentamos a ficha de fase que caracteriza todas as operações realizadas, assim também como o aperto realizado, faces a maquinar e ferramentas utilizadas.

Além das características apresentadas na sequência e maquinagem, é necessário referir características específicas que irão definir as operações, como a velocidade de corte, rotação da árvore e velocidade de avanço.

Também é referido quais as superfícies que devem ser controladas dimensionalmente e qual o instrumento a ser utilizado para esse controlo dimensional.

## Ficha Fase 10

NºFase	10	Máquina				Página:	1/1
Nome	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				Data:	22/05/17
Material	Bronze UA 9 NFE	Dispositivo de aperto				Responsável	
Cadência	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem			Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
1	A	Facejamento (desbaste)	157	1000	1000	Fresa Pastilhas Ø50	
2	B	Fresagem lateral (desbaste)	157	2000	3000	Fresa Pastilhas Ø25	
3*	E, F e G	Fresagem topo e lateral (desbaste)	188	5000	1500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
4*	C, I e H	Fresagem topo e lateral (desbaste)	126	10000	2600	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
5*	B	Fresagem lateral (Pré Acabamento)	151	4000	2000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
6*	B	Fresagem lateral (Acabamento)	226	6000	2000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Paquímetro
7*	B	Fresagem lateral (Acabamento)	226	6000	2000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Paquímetro
8*	A	Facejamento	314	5000	1500	Fresa 2 gumes Ø20 metal duro	



### Considerações sobre a Fase 10

Nº Operação	Considerações
3	Para o alívio de possíveis tensões no bruto e evitar possíveis deformações. Este passo é executado como segurança extra, uma vez que é a primeira vez que este material é trabalhado na empresa.
4	<p>Este passo podia ter sido feito de várias maneiras.</p> <p>Para a produção em série a estratégia mais correta seria dividir este passo em 2 distintos:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Passo de desbaste com uma fresa com maior diâmetro (ex:8mm), para desbastar de forma mais rápida e com menos esforço da fresa.</li> <li>2. Passo e desbaste com uma fresa de raio pequeno (ex:4mm), para desbastar material que a fresa de 8 não conseguiu (pormenores mais pequenos e raios&lt;4mm), sem esforços excessivos na fresa mais pequenas.</li> </ol> <p>Como estamos perante uma pequena série e para tornar mais rápido e prático a programação da peça e a sua influência no tempo final de maquinagem não vai ser determinante, optou-se pelo uso de um passo único para desbaste do patamar.</p>
5	Como o material já foi desbastado podemos dar um incremento maior em Z, uma vez que a fresa de 2 gumes também maquina ao longo do seu comprimento.
6	<p>Para a operação de acabamento utiliza-se uma fresa diferente com menos desgaste.</p> <p>O diâmetro real da fresa é de 12mm, mas no programa coloca-se um raio inferior para acabamentos para compensar o desgaste e flexão da fresa. Na FF&amp;I, optou-se por esta solução em vez da compensação da ferramenta diretamente da máquina uma vez que garante uma maior e rápida adaptabilidade aos processos que são realizados na empresa e tornou-se numa prática diária.</p>
7	As repetições dos passos de acabamento são realizadas para garantir a maior precisão possível.
8	<p>Este passo tem como objetivo garantir a planeza da face superior, uma vez que podem ter ocorrido algumas deformações na peça.</p> <p>Esta planeza vai ser necessária também para um bom suporte para as fases de maquinagem seguintes.</p>

As restantes faces maquinadas não são representadas, dado que são maquinadas em simultâneo a outras superfícies exibidas. Também as trajetórias geradas em operações de desbaste programadas com o DepoCam, são concebidas numa área de trabalho e possibilitam a maquinagem de todos os pormenores representados do CAD. A única desvantagem deste tipo de programação é que as trajetórias são geradas de forma a otimizar os movimentos da máquina e, por isso, não são adequadas para acabamentos superficiais.

Após finalizar a fase 10, conclui-se que a maquinação apresenta bons resultados e acabamento superficial, o que indica que os parâmetros de corte utilizados estão a obter **(figura 73)**.



**Figura 73 - peça após a fase 10**

A fase 10 além de fazer um desbaste para aliviar as tensões do metal, também acabou as faces laterais de modo a possibilitar a fixação da peça nas fases seguintes utilizando faces já maquinadas, que, como já foi abordado, permite garantir melhores acabamentos e precisão.

Mas antes da realização da próxima fase é necessário **limpar o material** que não foi maquinado e corresponde à parte inferior da peça onde estava a apertada **(figura 74a)**.

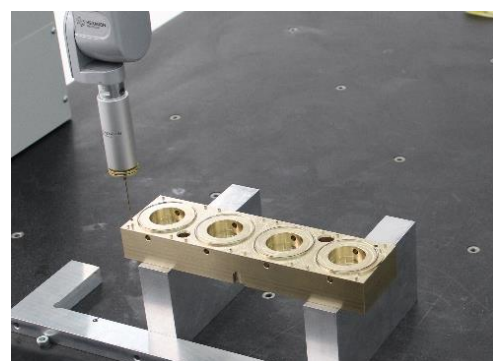
De maneira a otimizar o tempo, a primeira peça maquinada foi enviada a uma **fresadora convencional** para tirar o excesso de material enquanto a segunda peça estava a correr a primeira fase de maquinação. Esta etapa é necessária para garantir uma melhor precisão nas fases seguintes e foi utilizada a fresadora convencional uma vez que garantia uma maquinação mais rápida para uma simples operação de facejamento e ao mesmo tempo permite a maquinação da segunda peça.

Antes de iniciar a fase 20 e para avaliar o estado atual da maquinação, a peça foi levada ao **gabinete de metrologia para o controlo** das cotas acabadas, designadamente a planeza da face inferior obtida for fresagem convencional e as dimensões entre as faces laterais **(figura 74b)**.

Depois de confirmadas os valores referentes às faces acabadas, procedeu-se ao restante da maquinação.



**a) Material em excesso após a fase 10**



**b) Controlo dimensional das superfícies acabadas na fase 10**

**Figura 74 - Facejamento inferior e controlo dimensional após a fase 10**

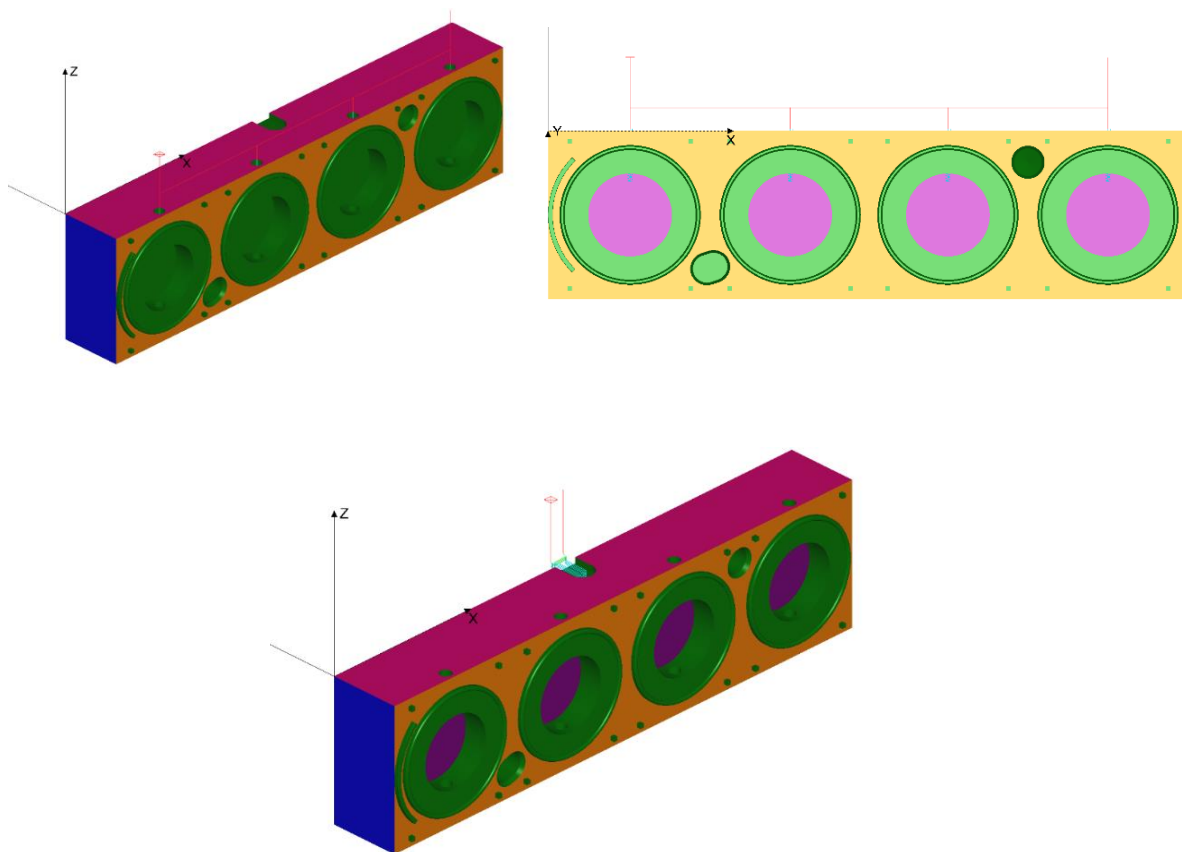
## Fase 20

Nesta fase foi utilizado o mesmo tipo de aperto que na fase anterior uma vez que garante um aperto de boa qualidade para peças prismáticas.

Para simplificar o processo de referenciar a peça nas fases seguintes e garantir o posicionamento correto, optou-se pela escolha um ponto de origem fixo para a peça de maneira a que as referências tiradas fossem sempre as mesmas, ou seja, a peça deverá ter sempre um ponto zero-peça fixo para que sejam utilizadas sempre as mesmas superfícies no processo de tirar os pontos de referência e assim diminuir os erros associados com a maquinação, uma vez que se utiliza sempre a mesma origem.

As referências para o ponto zero-peça serão as faces maquinadas na fase anterior uma vez que garantem melhor precisão e acabamento.

Algumas das operações programadas em CAD/CAM são ilustradas na **figura 75**, assim como também o referencial zero-peça a utilizar nesta fase.



**Figura 75 - Operações Fase 20**

## Ficha Fase 20

NºFase:	20	Máquina				Página:	1/1
Nome:	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				Data:	22/05/17
Material	Bronze UA 9 NFE	Dispositivo de aperto				Responsável	
Cadência	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem			Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
1	L	Ponteamento	94	5000	70	QBA Ø6 45°	
2	L	Furação	16	1000	70	Broca Helicoidal Aço rápido Ø5	Paquímetro
3	L	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	50	4000	300	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
4	L	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	50	4000	300	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
5*	L	Fresagem lateral do furo (corte contra)	50	4000	250	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	Paquímetro
6*	M	Fresagem topo e lateral (desbaste)	88	3500	1000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
7	M	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte a favor)	63	2000	500	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	
8	M	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte contra)	63	2000	400	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	Blocos Padrão
9	M	Quebrar Arestas	113	6000	800	QBA Ø6 45°	
Isostatismo							

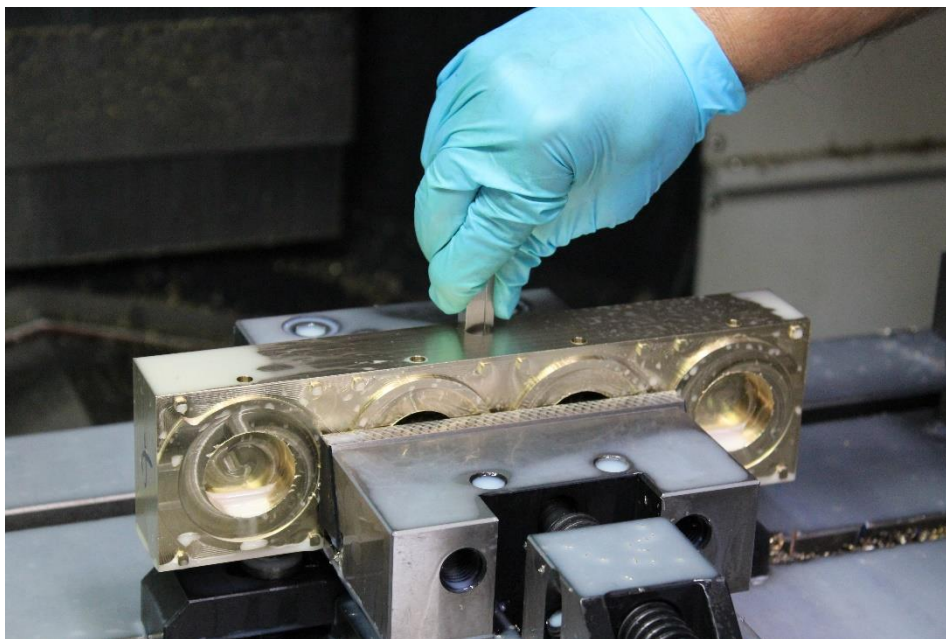


### Considerações sobre a Fase 20

Nº Operação	Considerações
5	<p>Estes 3 passos servem para assegurar a tolerância e acabamento do furo.</p> <p>A utilização de 2 passos com corte a favor e 1 com corte-contra servem para garantir o melhor acabamento possível.</p> <p>É importante primeiro realizar os cortes a favor e só depois o corte-contra, porque o corte-contra é um tipo de corte desfavorável, se o utilizarmos em primeiro pode tirar demasiado material, enquanto se passarmos em primeiro lugar um passo a favor, depois o passo contra vai apenas tirar um pouco mais de material.</p> <p>Como é um tipo de corte desfavorável deve-se diminuir um pouco a velocidade de avanço em corte.</p>
6	<p>Em certos casos a estratégia de contorno Z para operações de desbaste é mais rápida e igualmente eficaz à estratégia de desbaste do DEPOCAM.</p>

No final da maquinação da fase 20 procedeu-se ao controlo dimensional dos elementos maquilados, conforme o determinado na ficha de fase (**figura 76**).

Este controlo, se possível, deve ser efetuado sem desapertar a peça de maneira a algum erro de maquinação detetado possa ser corrigido sem a necessidade de um novo aperto e posicionamento da peça.



**Figura 76 - Controlo dimensional de um elemento conforme a ficha de fase**

Após a verificação da conformidade dos elementos maquilados, a peça pode ser desapertada e o sistema de aperto deve ser limpo de forma a garantir que nenhuma rebarba interfira com os próximos apertos. Este procedimento deve ser efetuado no final de cada fase de maquinação.

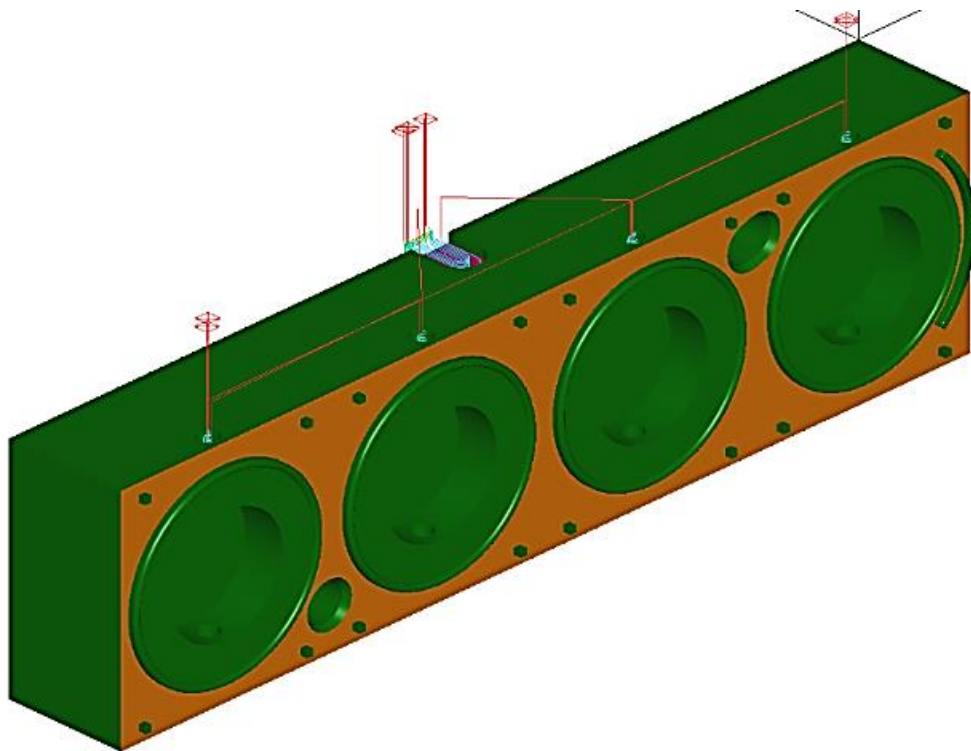
### Fase 30

Para esta fase é realizado o espelho das operações da fase anterior uma vez que a peça é simétrica. Assim, reduz-se significativamente o tempo de programação, relativo a esta fase, uma vez que se aproveita o trabalho realizado na fase anterior.

As operações espelhadas aparecem com o prefixo “Transformed”.

O sistema de fixação também é o mesmo utilizado na fase anterior e a origem da peça é dada de forma idêntica conforme o referencial apresentado na **figura 77**.

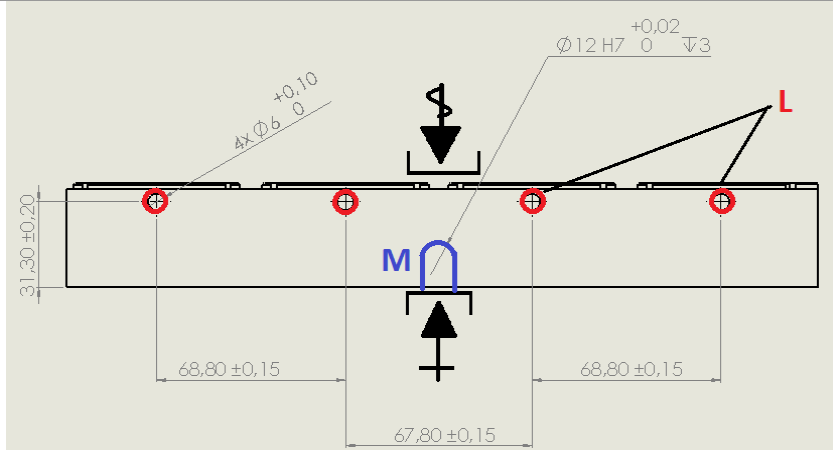
Apenas são necessárias algumas alterações nos ciclos de mandrilagem, que, por limitação do *software*, ao espelhar a operação o sentido de corte não varia e se não fosse alterado em vez de cortar a favor e cortar contra e o contrário também se aplicava.



**Figura 77 - Operações realizadas na fase 30 e referencial origem peça**

Mesmo não existindo diferenças muito grandes a nível das operações de maquinação, é uma fase totalmente diferente que é posicionada de uma forma diferente. Por isso apresentamos a ficha de fase que caracteriza e descreve as operações e trabalhos a serem realizados também para esta fase.

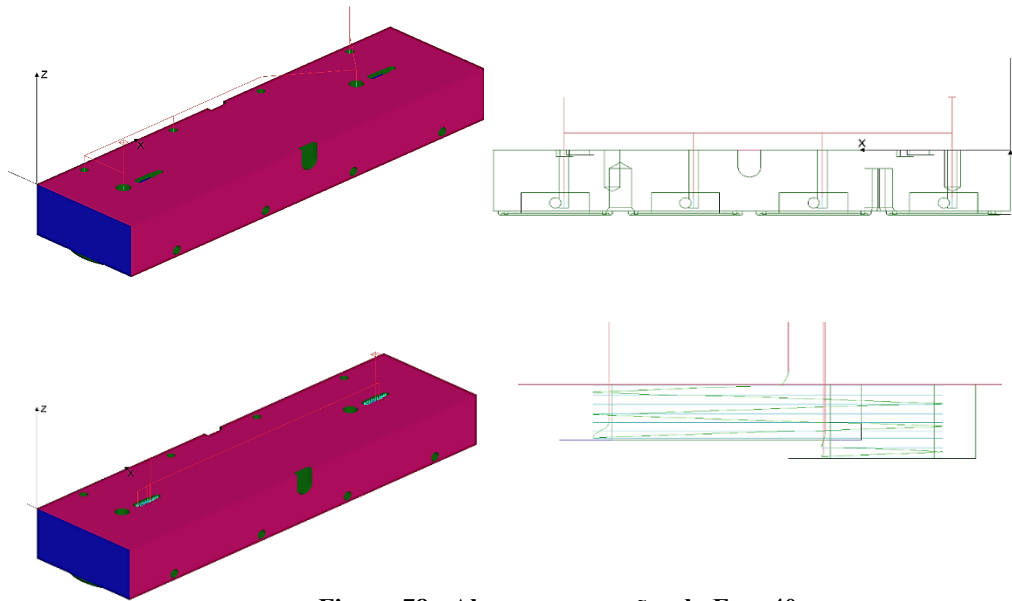
## Ficha Fase 30

NºFase	30	Máquina				Página:	1/1
Nome	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				Data:	22/05/17
Material	Bronze UA 9 NFE	Dispositivo de aperto				Responsável	
Cadência	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem			Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
1	L	Ponteamento	94	5000	70	QBA Ø6 45°	
2	L	Furação	16	1000	70	Broca Helicoidal Aço rápido Ø5	Paquímetro
3	L	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	50	4000	300	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
4	L	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	50	4000	300	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
5	L	Fresagem lateral do furo (corte contra)	50	4000	250	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	Paquímetro
6	M	Fresagem topo e lateral (desbaste)	88	3500	1000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
7	M	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte a favor)	63	2000	500	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	
8	M	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte contra)	63	2000	400	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	Blocos Padrão
9	M	Quebrar Arestas	113	6000	800	QBA Ø6 45°	
Isostatismo							
							

#### Fase 40

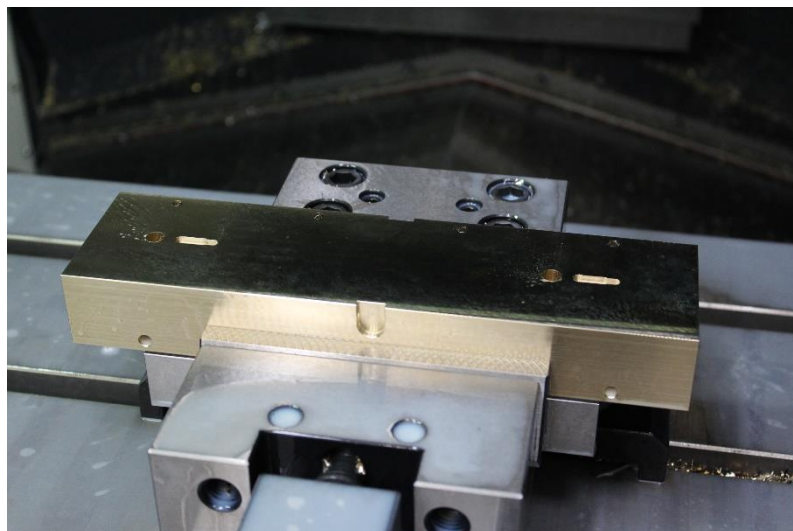
Nesta fase também é usado o mesmo dispositivo de fixação e o posicionamento da peça vai ser realizado de forma a garantir a utilização das superfícies para a determinação do ponto zero-peça de cada fase. O referencial representado na **figura 78** permite identificar mais facilmente quais as superfícies da peça utilizadas para o posicionamento nesta fase.

Também foi utilizado um comparador para auxiliar no aperto da peça, de maneira a garantir um melhor posicionamento e que a peça se encontra devidamente nivelada.



**Figura 78 - Algumas operações da Fase 40**

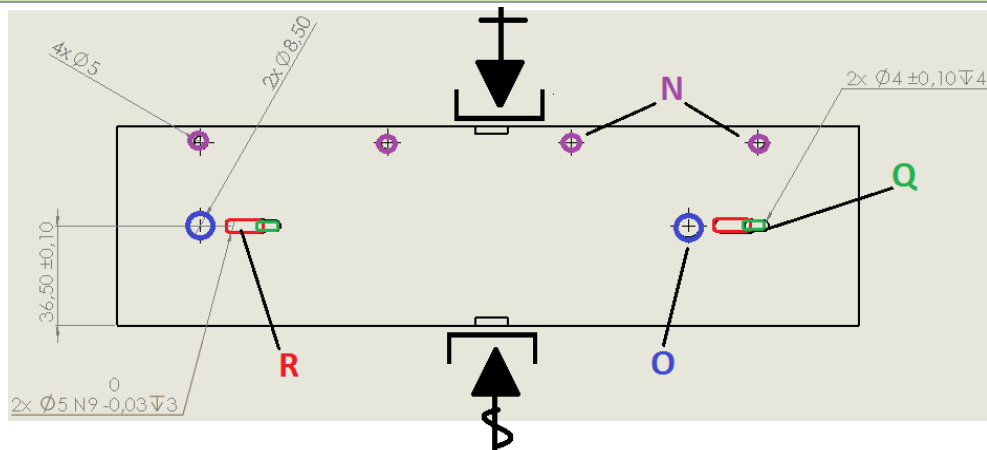
O resultado da maquinação realizada na fase 40 é apresentado na **figura 79**, onde também podemos verificar o posicionamento da peça.



**Figura 79 - Peça após a fase 40**

## Ficha Fase 40

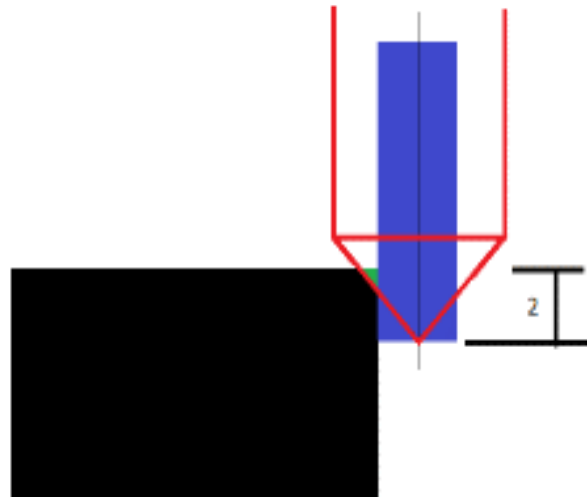
NºFase:	40	Máquina				Página:	1/1	
Nome:	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				Data:	22/05/17	
Material	Bronze UA 9 NFE	Dispositivo de aperto				Responsável		
Cadência	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves		
Operações de maquinagem				Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo	
1	N e O	Ponteamento	94	5000	100	QBA Ø6 45°		
2	N	Furação	47	3000	250	Broca Ø5 Helicoidal Aço rápido		
3*	N	Mandrilagem	24	1500	70	Mandril Ø5H7, aço rápido	Paquímetro	
4	O	Furação	27	1000	100	Broca Ø8,5 Helicoidal Aço rápido	Paquímetro	
5	Q e R	Fresagem topo e lateral (desbaste)	57	6000	1000	Fresa 2 gumes Ø3 metal duro		
6*	Q e R	Fresagem topo e lateral Acab. (corte a favor)	47	5000	700	Fresa 2 gumes Ø3 metal duro		
7	Q e R	Fresagem topo e lateral Acab. (corte contra)	47	5000	650	Fresa 2 gumes Ø3 metal duro	Blocos Padrão + Paquímetro	
8*	Q e R	Quebrar Arestas	188	10000	3000	QBA Ø6 45°		
9	B (lateral)	Quebrar Arestas	188	10000	3000	QBA Ø6 45°		
10	N	Escarear	151	8000	800	QBA Ø6 45°		
11	O	Escarear	151	8000	800	QBA Ø6 45°		
Isostatismo								



### Considerações sobre a Fase 40

Nº Operação	Considerações
3	O furo N é mandrilado para garantir a geometria plana em acabamento do fundo
6	O diâmetro 3.005 é dado para que a fresa possa tirar um pouco mais do que o valor teórico, e assim respeitar as tolerâncias pedidas.
	<p>Para quebrar arestas por contorno é necessário enganar a ferramenta, uma vez que a o “chanfro” que queremos criar não está representado e por isso o <i>software</i> não permite a sua maquinação sem recorrer à criação de novas superfícies para maquinação.</p> <p>Basicamente o programa é efetuado como se a ferramenta estivesse na posição teórica da ferramenta a azul, mas na verdade estamos a maquinar com a ferramenta a vermelho, conseguindo assim fazer o chanfro a verde (<b>figura 80</b>).</p>

8



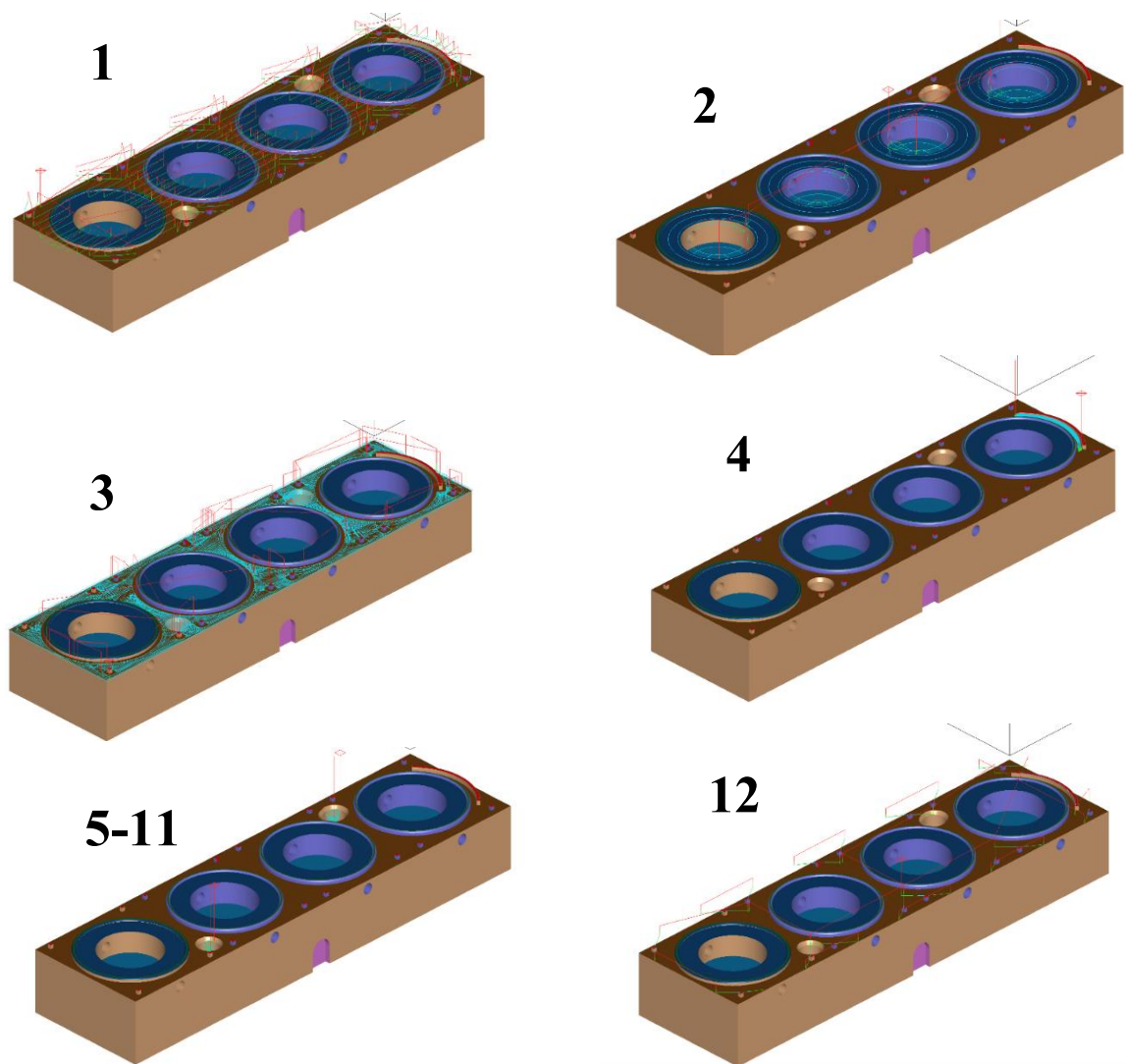
**Figura 80 - Esquema de programação para quebrar arestas**

### Fase 50

Nesta fase vão ser maquinados os elementos com tolerâncias mais apertadas da peça e por isso deve-se ter um cuidado especial com o aperto e posicionamento (**figura 82a**), principalmente devido à tolerância associada com o paralelismo entre a face superior e inferior.

Para facilitar o acompanhamento das operações, a **figura 81** pretende ilustrar de modo gráfico a sequencia e natureza das operações que foram efetuados e simuladas do *software*, onde as linhas azuis são as trajetórias onde a ferramenta está a maquinar e as linhas vermelhas os avanços rápidos.

A **ficha de fase** vai ser dividida em quatro folhas, ao contrário das anteriores, devido à quantidade de operações e informação associada a esta fase.



**Figura 81 - Operações Fase 50 completa**



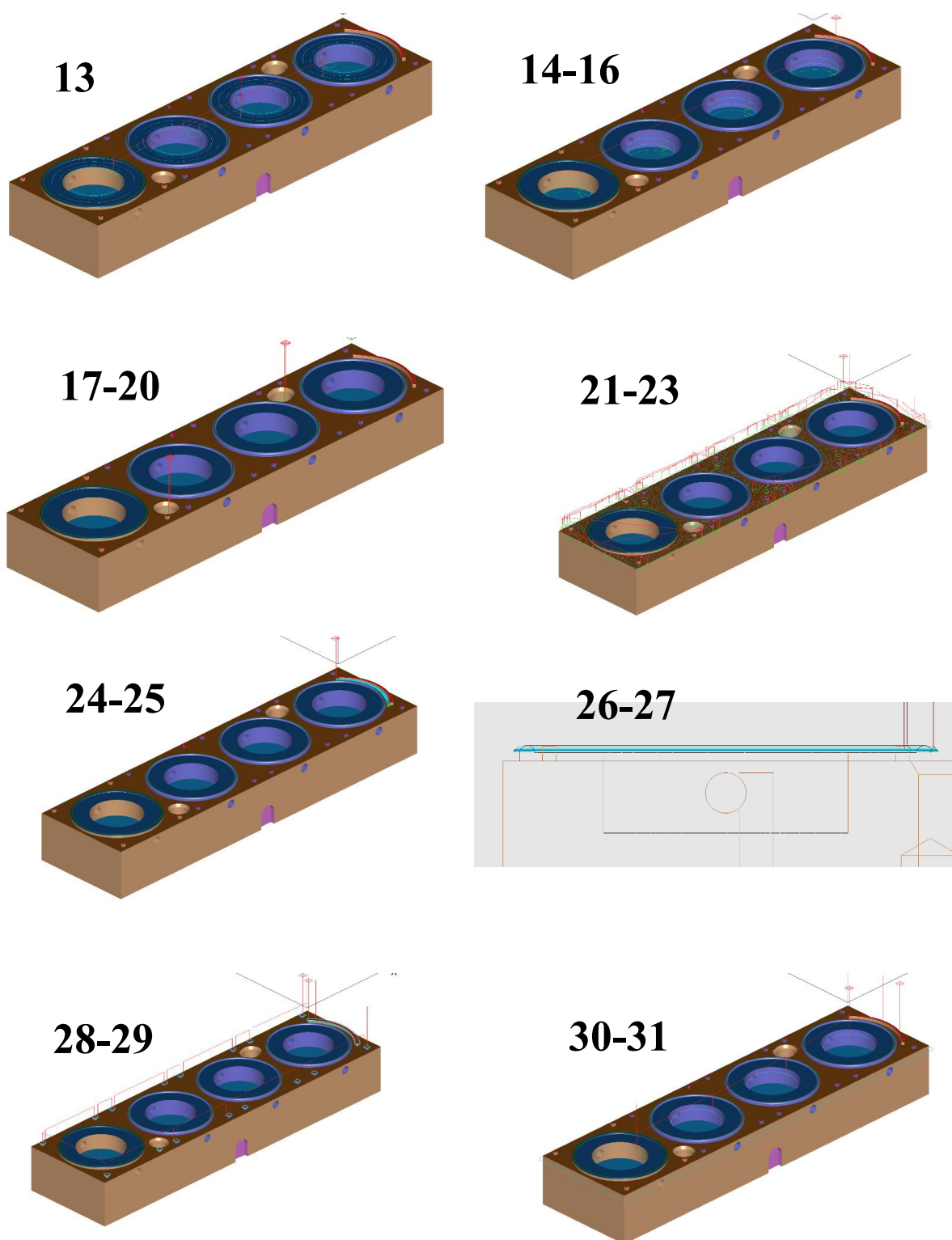


Figura 81 - Operações Fase 50 completa (continuação)

## Ficha Fase 50

<b>NºFase:</b>	<b>50</b>	<b>Máquina</b>				<b>Página:</b>	<b>1/4</b>
<b>Nome:</b>	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				<b>Data:</b>	22/05/17
<b>Material</b>	Bronze UA 9 NFE	<b>Dispositivo de aperto</b>				<b>Responsável</b>	
<b>Cadência</b>	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
<b>Operações de maquinagem</b>			<b>Dados de corte</b>			<b>Ferramentas</b>	
<b>Nº</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Vc m/min</b>	<b>n rpm</b>	<b>Vf mm/min</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Controlo</b>
<b>1</b>	A	Facejamento	201	8000	1500	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
<b>2</b>	G, F e E	Fresagem topo e lateral em desbaste	126	5000	1000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
<b>3*</b>	C, I e H	Fresagem topo e lateral em desbaste	126	10000	3000	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
<b>4</b>	J e C	Fresagem topo e lateral em desbaste	69	11000	1000	Fresa 2 gumes Ø2 metal duro	
<b>5</b>	S e T	Ponteamento	94	5000	70	QBA Ø6 45°	
<b>6*</b>	S	Furação	20	600	80	Broca Helicoidal Aço rápido Ø10,5	
<b>7*</b>	T	Furação	20	600	80	Broca Helicoidal Aço rápido Ø10,5	
<b>8</b>	S	Fresagem topo e lateral em desbaste	75	3000	400	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
<b>9</b>	T	Fresagem topo e lateral em desbaste	100	4000	6000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
<b>10</b>	S e T	Escarear	201	8000	1000	Fresa 2 gumes Ø8 com raio 1 metal duro	

Ficha fase 50 (continuação)

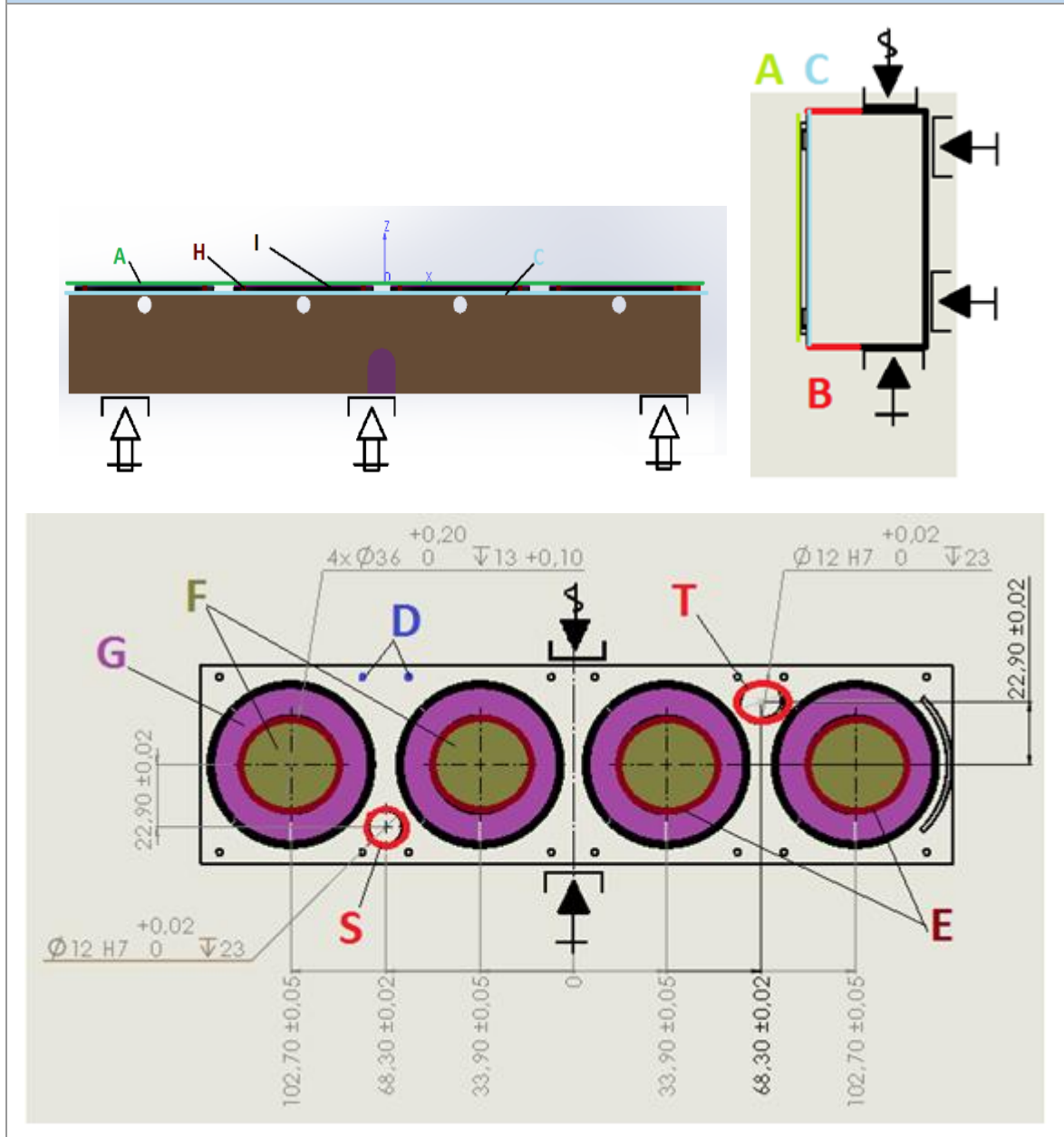
<b>NºFase:</b>	<b>50</b>	<b>Máquina</b>				<b>Página:</b>	<b>2/4</b>
<b>Nome:</b>	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				<b>Data:</b>	22/05/17
<b>Material</b>	Bronze UA 9 NFE	<b>Dispositivo de aperto</b>				<b>Responsável</b>	
<b>Cadência</b>	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem			Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
11*	A	Fresagem topo em acabamento	251	10000	500	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	CMM
12*	D	Fresagem topo em acabamento	251	10000	500	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	Paquímetro
13*	G	Fresagem topo e lateral em acabamento	151	6000	800	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
14*	E	Fresagem lateral em acabamento	100	4000	800	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	Paquímetro
15	E	Fresagem lateral em acabamento	100	4000	800	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	Paquímetro
16*	F	Fresagem topo em acabamento	151	6000	800	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	Paquímetro
17	S	Fresagem topo e lateral em acabamento	75	3000	300	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
18	S	Fresagem topo e lateral em acabamento	75	3000	300	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	Calibre Tampão 12H7 + CMM
19	T	Fresagem topo e lateral em acabamento	75	3000	300	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
20	T	Fresagem topo e lateral em acabamento	75	3000	300	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	Calibre Tampão 12H7 + CMM

Ficha fase 50 (continuação)

NºFase:	50	Máquina				Página:	3/4
Nome:	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)				Data:	22/05/17
Material	Bronze UA 9 NFE	Dispositivo de aperto				Responsável	
Cadência	2peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem			Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
21	I e H	Fresagem lateral em desbaste	100	8000	1000	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
22	I e H	Fresagem lateral em acabamento	100	8000	700	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
23*	I, H, C	Fresagem topo e lateral em acabamento	100	8000	1000	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	
24	J e C	Fresagem topo e lateral em acabamento	50	8000	800	Fresa 2 gumes Ø2 raio 0,2 metal duro	
25	J e C	Fresagem topo e lateral em acabamento	50	8000	800	Fresa 2 gumes Ø2 raio 0,2 metal duro	
26*	Raio de A com I	Fresagem em contorno de forma em acabamento	69	11000	2500	Fresa 2 gumes Ø2 raio 0,2 metal duro	CMM (ótica)
27*	Raio de A com I	Fresagem em contorno de forma em acabamento	69	11000	2500	Fresa 2 gumes Ø2 raio 0,2 metal duro	CMM (ótica)
28	D	Quebrar Arestas	69	11000	2000	Fresa 2 gumes Ø2 raio 0,2 metal duro	
29*	D	Quebrar Arestas	69	11000	2000	Fresa 2 gumes Ø2 raio 0,2 metal duro	
30	B (lateral)	Quebrar Arestas	151	8000	1000	QBA Ø6 45°	
31*	E	Quebrar Arestas	151	8000	1000	QBA Ø6 45°	

## Ficha fase 50 (continuação)

NºFase:	50	Máquina	Página:	4/4
Nome:	P1612285	Fresadora CNC (Doosan DNM 650)	Data:	22/05/17
Material:	Bronze UA 9 NFE	Dispositivo de aperto	Responsável	
Cadência	2peças	Prensa mecânica	Cláudio Neves	
Isostatismo				



Devido à complexidade e quantidade de cotas a maquinar nesta fase, não são representadas todas as superfícies a ser maquinadas nem todas as cotas a serem controladas, sendo apresentadas apenas as mais importantes.

Como forma de simplificar e complementar a informação deve-se utilizar as simulações da programação CAD/CAM e o desenho de definição (figura 81 e 71), que são as ferramentas utilizadas na empresa.

### Considerações sobre a Fase 50

Nº Operação	Considerações
3	É semelhante ao feito na primeira fase, mas agora como há menos material a desbastar aumentou-se o avanço em corte e o espaçamento da trajetória gerada de modo à maquinação se tornar mais rápida.
6	Serve para reduzir o esforço que a fresa teria que fazer para o desbaste do furo 12H7.
7	Serve para reduzir o esforço que a fresa teria que fazer para o desbaste da caixa 12H7.
11	Por contorno para realizar e planear uma trajetória mais uniforme
12	O diâmetro de 8.1 serve para evitar possíveis marcas na peça no plano XY e não influencia os passos em Z.  A ferramenta utilizada é a mesma que no ultimo passo para garantir a cota entre os 2 planos maquinados nas operações 11 e 12.  A sobre-espessura considerada também tem em vista a tolerância requerida entre os 2 planos.
13	Considerou-se o diâmetro virtual da 7.95 para dar um pouco mais de folga ao diâmetro deste rebaixo
14	Considerou-se o diâmetro virtual da 7.82 para dar um pouco mais de folga ao diâmetro das caixas.  A folga considerada foi um pouco superior uma vez que o cliente nos indicou qual a funcionalidade da peça, e por isso escolheu-se maquinar esta face mais perto da cota mínima para realizar a função.
16	Este programa foi transformado de maneira a ir um pouco mais abaixo da cota nominal para garantir as tolerâncias  O diâmetro 7.95 é dado para que esta operação não toque na face lateral das caixas uma vez que já foram acabadas
23	Esta operação não fica visualmente muito bonita, mas é mais prática de maquinar para poucas peças e evita a formação de degraus na maquinação (fruto do uso de fresas diferentes para acabar a mesma superfície).
26	Usa-se o raio de canto virtual de 0.3 para que a fresa tire mais material para cumprir a tolerância
27	A operação de acabamento do raio esta dividida em duas uma vez que estamos a maquinar uma face esférica através de aproximações com incrementos em Z. Assim podemos variar os incrementos para obter uma aproximação mais suave.
29	O passo de contorno em Z seria apenas tangente às arestas das ilhas, mas ao dar um raio de canto virtual maior, esta operação já vai realizar um pequeno <i>fillet</i> em cada ilha, quebrando as arestas e eliminando qualquer rebarba existente.
31	Foi necessário diminuir o diâmetro virtual uma vez que as caixas estão com um diâmetro maior que o nominal.

Nesta fase ainda é importante salientar a importância de um bom posicionamento (**figura 82a**) para obter bons resultados na maquinagem da peça (**figura 82b**).



### a) Posicionamento da peça com comparador



**b) Maquinagem de uma operação**

**Figura 82 - Etapas da Fase 50**

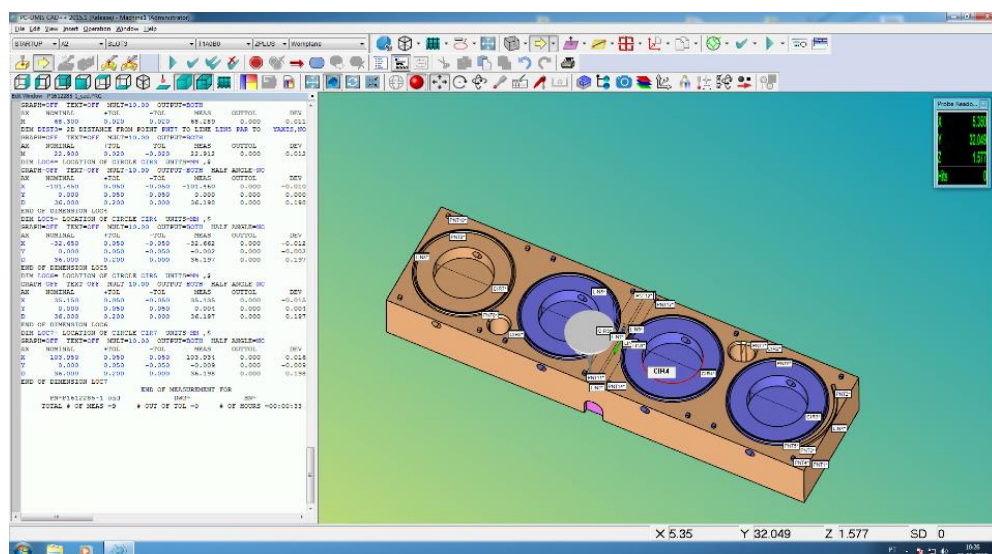
#### 5.3.4. Controlo dimensional e geométrico

Após a maquinação das peças, efetuou-se o seu controlo dimensional e geométrico recorrendo às CMM disponíveis no gabinete de metrologia.

Para mais detalhe no processo de medição utilizando uma CMM ver **anexo 1**.

Foram efetuadas três medições devido às características da peça e limitações das CMM (**figura 83**).

- 1) Medição dos elementos maquinados nas faces laterais e superior e do paralelismo entre a face superior e inferior recorrendo a uma CMM de 5 eixos;
- 2) Medição dos elementos da face inferior utilizando uma CMM de 3 eixos
- 3) Medição das dimensões da fase superior (impossíveis de medir com ponteira), com uso do sistema de visão presente na mesma CMM de 3 eixos.



**Figura 83 - Exemplo de um programa e medições efetuadas**



### 1) Medição por toque na CMM 5eixos (figura 84)

- Alinhar a peça e dar a sua localização à máquina através de toques manuais;
- Criar um plano de segurança em Z;
- Passar a modo automático;
- Escolher quais os elementos alcançáveis a partir do plano Z+ a medir a partir do CAD e qual a estratégia de medição do mesmo;
- Mover a ponteira para uma localização segura e efetuar a sua rotação segundo o plano sobre o qual queremos efetuar medições (é necessário desligar o plano de segurança em Z);
  - Criar um ponto (ou pontos) de aproximação à superfície, de modo a evitar colisões entre a ponteira e a máquina;
  - Escolher quais os elementos alcançáveis a partir do plano atual a medir a partir do CAD e qual a estratégia de medição do mesmo;
  - Após medição de todos os elementos, criar relações entre eles e o *software* irá calcular e verificar se está dentro do intervalo de tolerância.

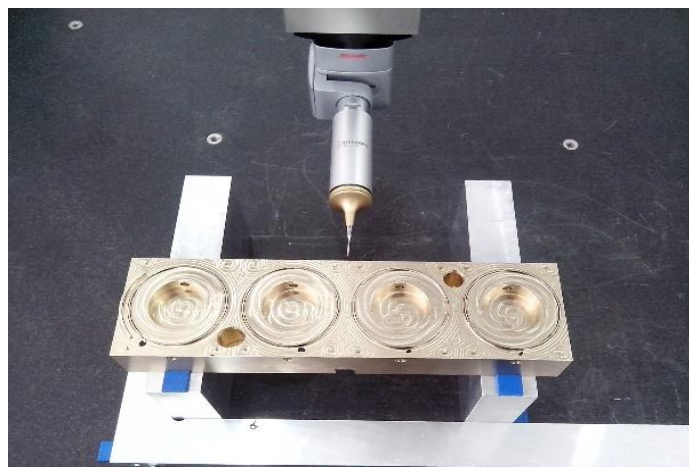


Figura 84 - Medição da peça na CMM 5 eixos

### 2) Medição por toque na CMM 3eixos (ver Anexo 1)

- Efetuar alinhamento (figura 85);
- Criar um plano de segurança em Z;
- Passar a modo automático;
- Escolher quais os elementos alcançáveis a partir do plano Z+ a medir a partir do CAD e qual a estratégia de medição do mesmo;
- Criar relações entre elementos e verificar se estão dentro dos intervalos de tolerância.

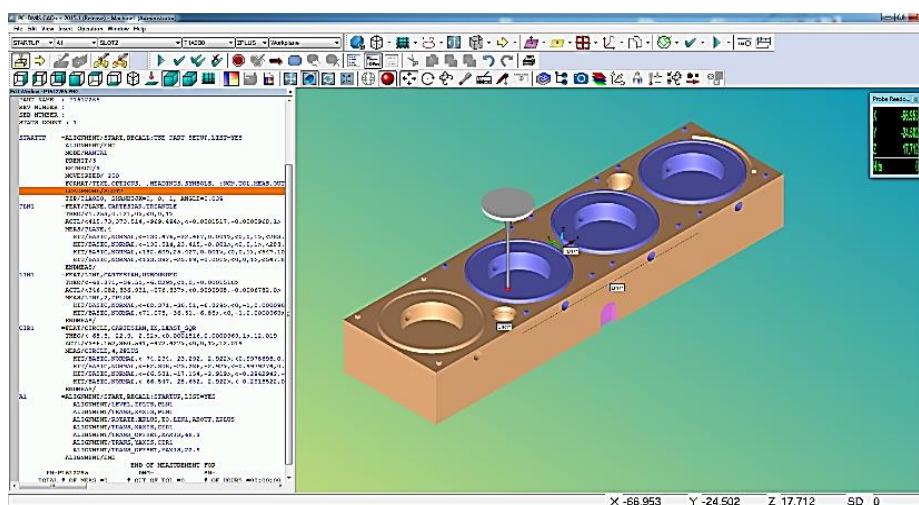
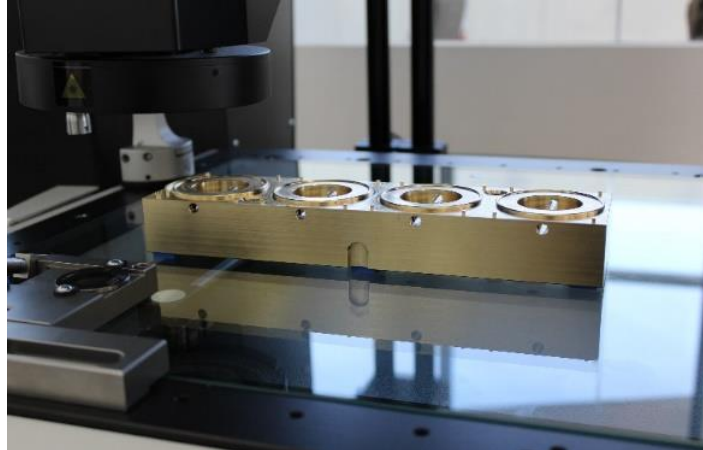


Figura 85 - Exemplo de alinhamento

### 3) Medição por visão na CMM 3eixos (figura 86)

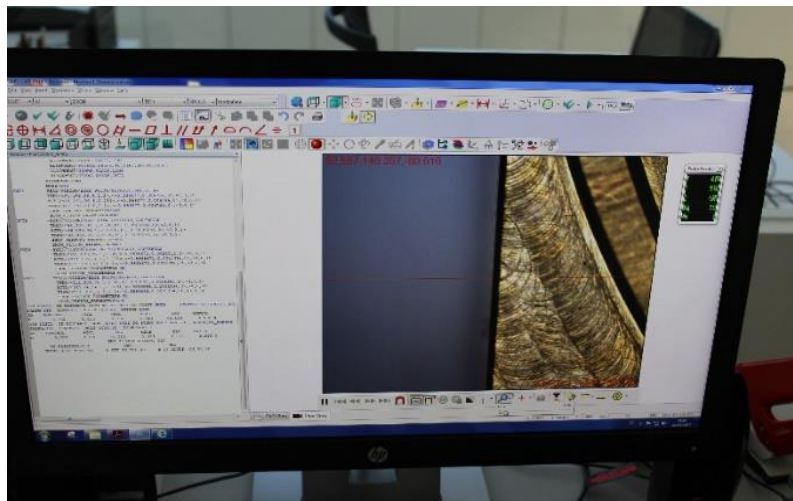
- Efetuar alinhamento 2D + Z aproximado;
- Criar um plano de segurança em Z;
- Passar a modo automático;
- Escolher quais os elementos alcançáveis a partir do plano Z+ a medir a partir do CAD e qual a estratégia de medição do mesmo;
- Verificar se a iluminação aplicada é a mais indicada para efetuar essa medição
- Criar relações entre elementos e verificar se estão dentro dos intervalos de tolerância.



**Figura 86 - Medição na CMM 3eixos com a câmara de visão**

O *software* está equipado com uma interface dedicada a medição utilizando os dispositivos de visão da CMM que permite observar a imagem captada pela câmara da CMM e permite identificar os elementos a medir na mesma janela (**figura 87**).

Os pontos são determinados através da diferença de gradiente na imagem, daí a iluminação ter uma importância tão preponderante neste método, uma vez que vamos obter pontos mais precisos consoante o contraste entre os elementos.



**Figura 87 - Interface do programa com uso da visão**

A medição com uso da CMM tem objetivo de verificar todas as cotas toleranciadas representadas no desenho de definição.

## Resultados do controlo dimensional

Os relatórios apresentados a baixo são referentes à segunda medição e os restantes estarão anexados a este relatório de estágio (**Anexo3**).

Para facilitar a interpretação das medições efetuadas, utiliza-se dois tipos de relatórios disponíveis.

**O primeiro**, mais gráfico, que representa os elementos medidos e os desvios obtidos da cota nominal, recorrendo a modelo 3D (**figura 88**).

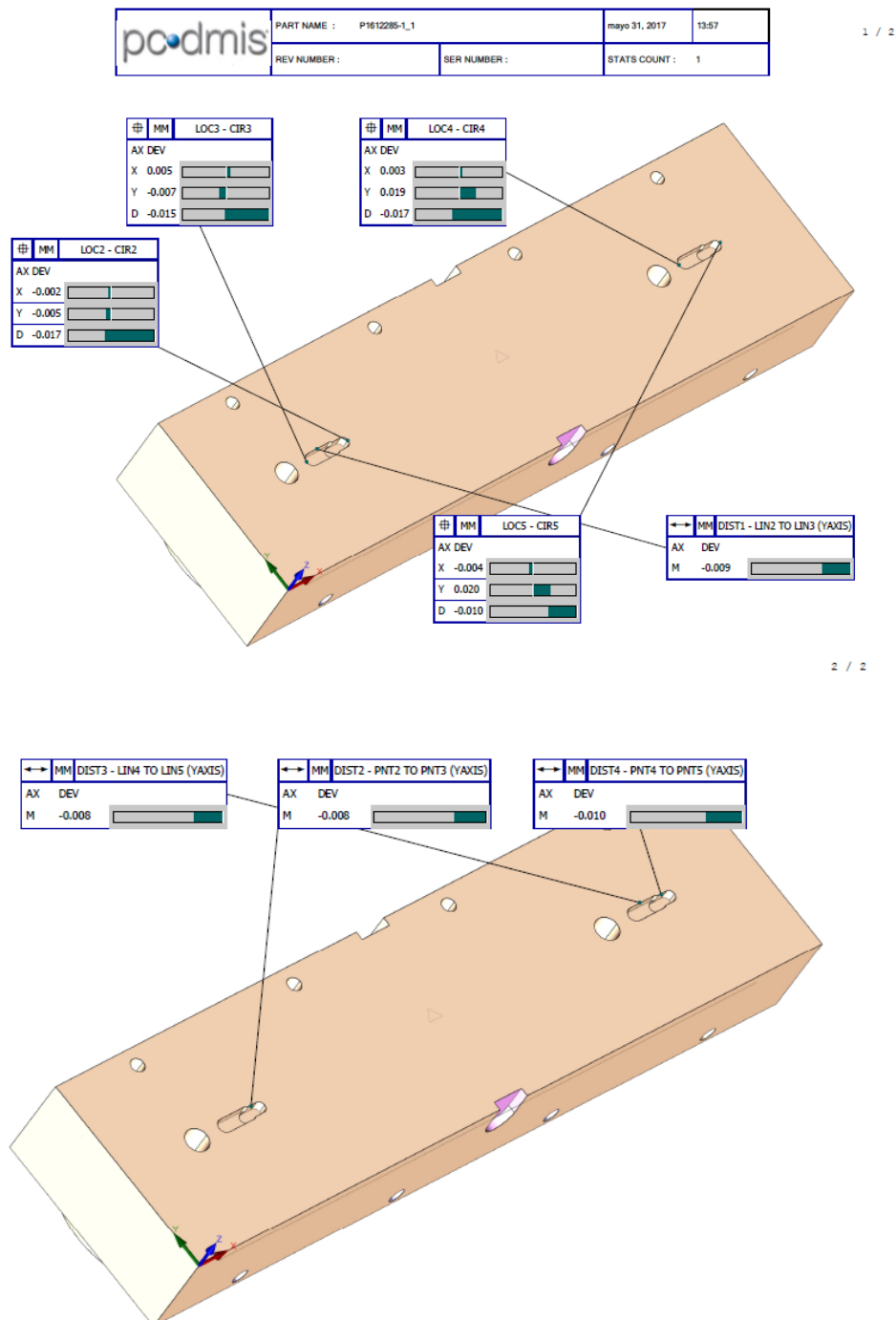


Figura 88 - Relatório dimensional gráfico do caso de estudo 3

O **segundo relatório** representa as medições efetuadas e mostra quais os valores nominais, o intervalo de tolerância correspondente e o valor da medição real em mm, com resolução de  $10^{-6}$  m (**tabela 11**).

**Tabela 11 - Resultados da medição por CMM do caso de estudo 3**

Production Part Approval Process Dimensional Results						
Supplier:			Part Number:			
<Supplier>			<Part Number>			
Inspection Facility:			Part Name:			
<Inspection Facility>			P1612285-1_1			
Sample Identification:			Revision:			
<Identification>						
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	58.250 (LOC2-X)	0.050	-0.050	58.248	✓	
2	36.500 (LOC2-Y)	0.050	-0.050	36.495	✓	
3	4.000 (LOC2-D)	0.000	-0.030	3.983	✓	
4	42.750 (LOC3-X)	0.050	-0.050	42.755	✓	
5	36.500 (LOC3-Y)	0.050	-0.050	36.493	✓	
6	5.000 (LOC3-D)	0.000	-0.030	4.985	✓	
7	222.750 (LOC4-X)	0.050	-0.050	222.753	✓	
8	36.500 (LOC4-Y)	0.050	-0.050	36.519	✓	
9	5.000 (LOC4-D)	0.000	-0.030	4.983	✓	
10	238.250 (LOC5-X)	0.050	-0.050	238.246	✓	
11	36.500 (LOC5-Y)	0.050	-0.050	36.520	✓	
12	4.000 (LOC5-D)	0.000	-0.030	3.990	✓	
13	5.000 (DIST1-M)	0.000	-0.030	4.991	✓	
14	4.000 (DIST2-M)	0.000	-0.030	3.992	✓	
15	5.000 (DIST3-M)	0.000	-0.030	4.992	✓	
16	4.000 (DIST4-M)	0.000	-0.030	3.990	✓	

Recorre-se a estas duas formas de representação dos resultados, dado que são complementares e facilitam a compreensão do processo de medição realizado, que de outra forma, seria mais complicado de explicar.

### 5.3.5. Conclusões

As formas de organização das etapas de maquinação convencionais, ajudam à sistematização do mesmo, mas por vezes podem se tornar confusas, especialmente em casos onde se realize um numero elevado de operações num numero elevado de faces.

Esta limitação é especialmente visível no caso de maquinação de geometrias complexas recorrendo a CNC de 5eixos.

Por isso, é mais simples representar a maquinação CNC operação a operação.

**Em anexo**, é apresentada uma proposta de organização da maquinagem, que deverá se completada com imagens de cada operação (**anexo 4**).

As limitações envolvidas com a maquinagem de 3 eixos foram evidentes:

- Tempo de maquinagem elevado;
- Erros associados à recolocação/reposicionamento da peça em cada fase;
  - Principal influência nas tolerâncias geométricas que estão no limite da tolerância;
- Soluções integradas nas máquinas de 3 eixos;
  - Uma vez que as CNC 5 eixos têm soluções integradas tecnologicamente mais avançadas, que permitem mais precisão e rapidez.

O processo de maquinagem de pequenas séries é um processo altamente iterativo, que recorre dos conhecimentos e experiência do operador e permite uma alteração e/ou ajuste em tempo real dos parâmetros utilizados para garantir a melhor qualidade possível de maquinagem.

Esta iteratividade é possível uma vez que o tempo “perdido” nos ajustes não apresenta uma influencia determinante no custo final da peça.

Na maquinagem desta peça, foram utilizados alguns procedimentos não usuais, que proporcionam a diminuição do tempo e esforço da programação, que, embora aumente o tempo de maquinagem, diminui o tempo total de produção da peça.

O controlo dimensional é extremamente importante para garantir os requerimentos do cliente. Por isso, é de boa prática realizar o controlo dos elementos maquinados sempre que possível (controlo intermédio).

O controlo final foi realizado em três medições distintas para a verificação de todos os elementos maquinados nas diferentes superfícies.

A maquinagem a 5 eixos limita a possibilidade de realizar controlo intermédio, uma vez que, geralmente, não existem fases intermédias onde exista necessidade de reorientar a peça a ser maquinada.

Após a peça estar aprovada é embalada e colocada numa prateleira específica, onde irá ficar até ser realizado o seu transporte até ao cliente final.



**Figura 89 - Peças embaladas e prontas para envio**



## 5.4. Otimização de uma fase de maquinação a 5 eixos

### 5.4.1. Introdução

Após os conhecimentos adquiridos na maquinação a 3 eixos, o passo seguinte é a exploração das realidades da maquinação a 5 eixos, as suas vantagens e também as suas problemáticas.

De acordo com as peças cuja maquinação estava para ser iniciada, escolheu-se a peça 005.14.001.001 (figura 90) uma vez que tinha algumas características diferentes da normalidade em fábrica, designadamente:

- É uma série de 900 peças;
- Já existe um programa feito para a maquinação, uma vez que já foi feita uma encomenda destas peças anteriormente;
- É uma peça com superfícies inclinadas, cuja maquinação é facilitada pelo uso de uma CNC com 5 eixos.

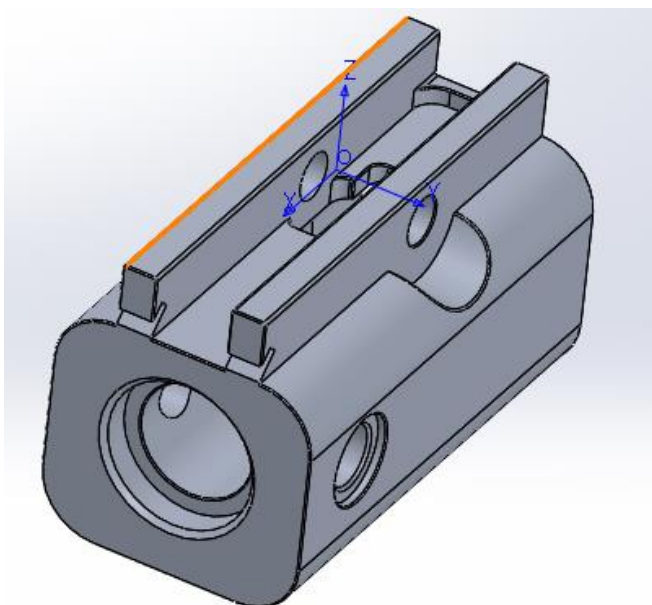


Figura 90 - Modelo 3D do caso de estudo 4

Neste caso de estudo, é apresentada apenas a primeira fase (Fase 10) de maquinação em que se recorreu à programação a 5 eixos.

Optou-se por não apresentar detalhes sobre a Fase 20 uma vez que já saía do âmbito do caso de estudo, e recorria uma vez mais à maquinação a 3 eixos e era constituída de operações simples, contudo ainda será abordada, uma vez que é parte integrante para a maquinação da peça na íntegra.

Os principais objetivos a atingir com este caso de estudo é a **otimização de um processo de maquinação e programa já existentes** e o **estudo do controlo dimensional efetuado na fábrica para grandes séries**.

Com a **otimização do processo** pretende-se diminuir os tempos de maquinação, melhorar a qualidade dos acabamentos obtidos e criar um programa robusto para cada peça, uma vez que os brutos têm algumas diferenças nas suas dimensões o que pode causar esforços exagerados em algumas operações.

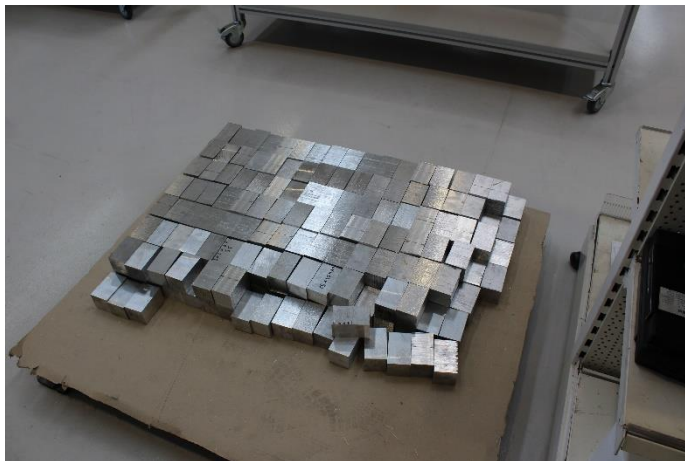
O **estudo do controlo dimensional manual** é feito de modo a conhecer as diferenças de abordagem, Pequenas Séries versus Grandes Séries aplicadas na fábrica e também das limitações da medição manual em relação à medição através de CMM e as vantagens associadas.

#### 5.4.2. Preparação da produção

É proposto maquinar 900 peças (**figura 90**) com a referência 005.14.001.001 em Alumínio AW 6082 e o bruto já foi previamente encomendado pelo gabinete de produção e será entregue em partes devido ao numero elevado de peças a maquinar (**figura 91**).

Os brutos têm um sobre-espessura variada, fruto do processo de obtenção e as dimensões gerais são de 100x55x55mm.

Esta variância na dimensão do bruto leva a que sejam necessários cuidados adicionais, dado que estamos a preparar a produção de uma grande quantidade de peças.

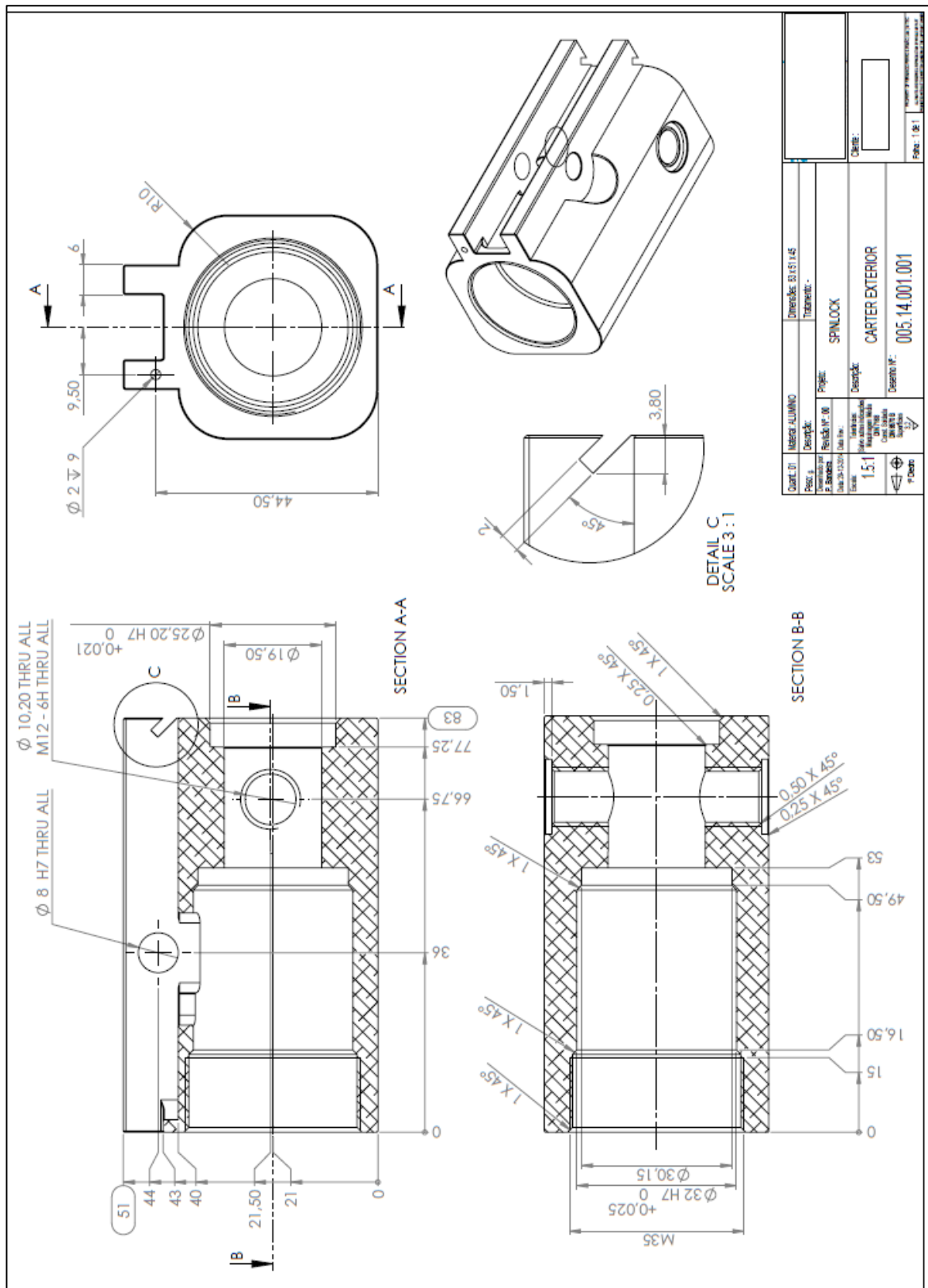


**Figura 91 - Matéria-prima para maquinação do caso de estudo 4**

Como estamos perante uma **peça prismática**, então a maquinação deve ser efetuada num centro de maquinação CNC e o centro de maquinação escolhido foi a fresadora CNC de 5 eixos DMG Mori Milltap 700. Esta escolha foi influenciada pelos seguintes fatores:

- **Máquina utilizada nas séries anteriores** e já existe um programa.
- Como estamos perante uma peça com geometrias complexas (**figura92**) e onde o tempo é um fator essencial é necessário recorrer à **maquinação por 5 eixos (não contínuos)** para otimizar os tempos de maquinação;
- Máquina que **permite maquinação a alta-velocidade**, que é um fator relevante, dado que o material é alumínio e pode ser maquinado a velocidades elevadas sem desgaste das ferramentas, o que significa tempos de maquinação mais reduzidos.

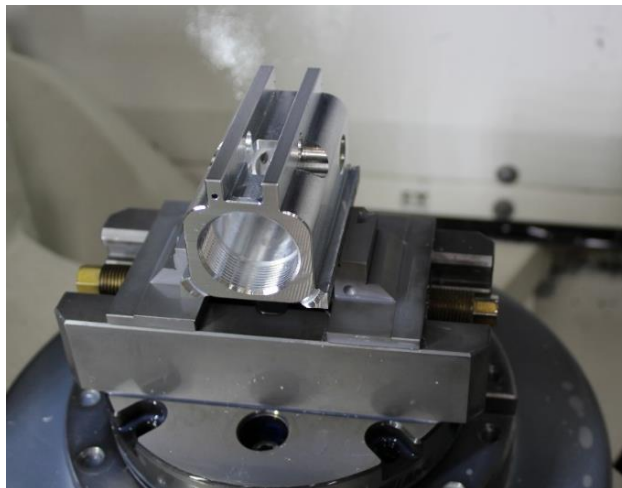




**Figura 92 - Desenho técnico do caso de estudo 4**

Antes de se avançar para a maquinação é importante sempre pensar nos passos principais que são necessários de realizar até à peça final. Para isso realiza-se um esboço desses mesmos passos que podem ser resumidos a 2 fases:

- 1) Maquinação de desbaste e acabamento a 5 eixos das principais características da peça (**figura 93**)
- 2) Maquinar a face correspondente ao local de aperto da primeira fase e o seu acabamento.



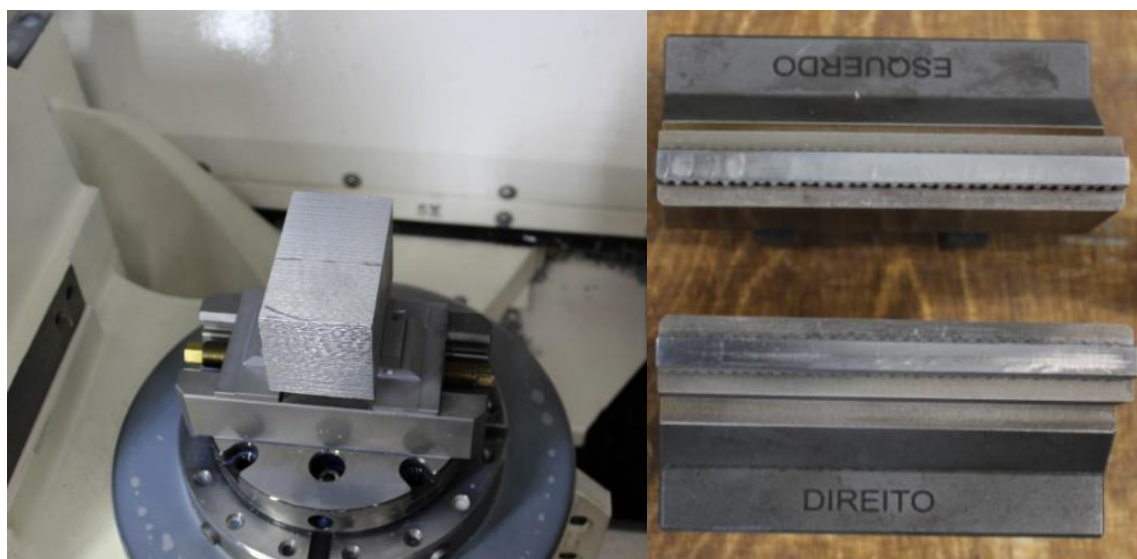
**Figura 93 - Peça após maquinação**

#### **5.4.3. Maquinação**

O sistema de fixação escolhido foi uma **prensa mecânica pequena com garras (figura 94)**, uma vez que garante um aperto forte na peça embora provoque marcas, o que neste caso não é problema uma vez que a superfície de aperto ainda não está maquiada.

Este sistema foi uma das **alterações ao processo** de maquinação existente, que consistia num gabari que garantia mais superfície de contato no aperto. A desvantagem do gabari era que não permitia a maquinação de tantas superfícies como este tipo de aperto.

Para garantir que o novo sistema de aperto era adequado realizou-se a maquinação de algumas peças para verificar se os resultados obtidos e a conformidade com as tolerâncias pedidas.



**Figura 94 - Sistema de aperto utilizado**

Como estamos perante uma grande série, os tempos de referenciar e determinar o zero-peça recorrendo ao apalpador incorporado da máquina iria influenciar significativamente o tempo final da maquinação. Por isso recorreu-se a outra metodologia para o **posicionamento da peça**:

1. As primeiras peças seriam referenciadas por sonda para verificar os tempos e qualidade na maquinação
2. As peças seguintes teriam que recorrer a um sistema que permitisse o seu posicionamento de maneira rápida, sem recorrer às sondas e que permita a maquinação da peça.

Este posicionamento rápido é possível devido aos seguintes pontos:

- A prensa tem um aperto centrado, ou seja, ambas “faces” são móveis o que garante sempre o mesmo posicionamento da peça em Y;
- Como a prensa está fixa, a posição do ponto Z da peça só depende da geometria do bruto e das imprecisões associadas ao seu corte;
- Para posicionar em X, recorremos a um calibre com valor fixo que é a distancia entre a prensa e a face da peça. Assim garantimos um posicionamento rápido e aproximado em X com erros inferiores a 1mm. Este posicionamento é complementado pelo passo seguinte.
- Todas as peças são efetuadas por contorno. Ou seja, a origem do referencial é no centro da face superior da peça.
  - Maquinação de todas as faces laterais por igual
  - Permite um posicionamento aproximado, desde que se garanta uma sobre-espessura suficiente em cada face lateral para a maquinação.
  - Permite dividir os esforços referentes ao desbaste do bruto por todas as faces da peça.

Um dos objetivos era otimização do programa e aspetos do processo, de maneira a diminuir os tempos de maquinação e preparação da máquina sem colocar em causa a qualidade de acabamento.

As principais alterações efetuadas para otimizar o processo foram:

- Como a altura do bruto podia variar um pouco, optou-se pela inclusão de uma operação inicial de faceamento da face superior, para garantir que a maquinação iniciasse toda com a mesma origem em Z, evitando esforços excessivos das ferramentas em algumas das operações quando a peça tivesse uma sobre-espessura maior em Z;
- Foram alteradas algumas velocidades de avanço em operações de desbaste para reduzir os tempos de maquinação;
- Para otimização dos tempos de maquinação e acabamentos, utilizaram-se algumas ferramentas mais específicas (**figura 95**) para diminuir os tempos gastos em algumas operações.



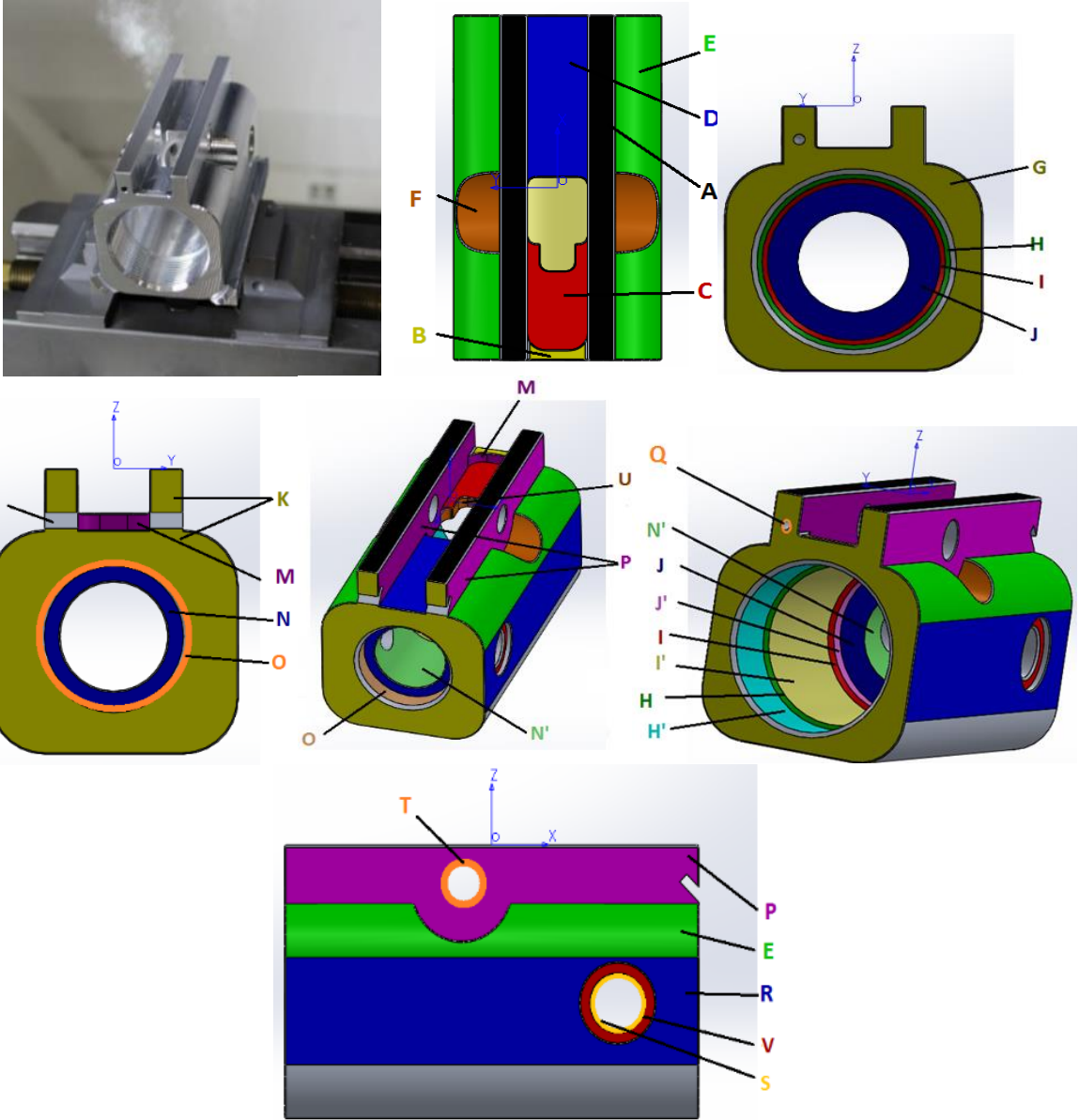
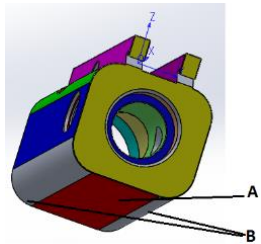
**Figura 95 - Ferramentas utilizadas para aumentar a produtividade da maquinação**

### Sequência de maquinação

Como estamos perante uma peça complexa, que recorre a várias operações, a elaboração de uma sequência de maquinação torna-se algo complicada, devido à dificuldade de garantir uma fácil interpretação da mesma.

Pretende demonstrar as principais etapas da maquinação, assim como, as superfícies a maquinar e o sistema de fixação utilizado.

Sequência de Maquinação		
<b>Nome:</b> 005.14.001.001	<b>Material:</b> Alumínio AW 6082	<b>Data:</b> 26/05/17
<b>Responsável:</b> Cláudio Neves		
<b>Fase 10</b>		
<b>Máquina:</b> Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)		
Operações	Ferramentas	
Facejamento topo (debaste) de A	Fresa de pastilhas (roca)	
Desbaste Topo e Lateral de A, B, E, F, P e R	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste Topo de A	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento Lateral de R, K e G	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste topo (rebaixo superior) B e C	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento de forma de E	Fresa de forma aço rápido	
Furação de H, I, J, N e O	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste Furo H, I, J, N e O	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento Furo J e O	Fresa 2 gumes metal duro	
Chanfros interiores de I e N	Fresa 2 gumes metal duro	
Rasgo com inclinação L	Fresa em T aço rápido	
Roscagem c/ Buril H	Buril	
Desbaste Topo e Lateral de D, U e M	Fresa 2 gumes metal duro	
Desbaste Topo e Lateral de F	Fresa 2 gumes metal duro	
Resto do desbaste com fresa U (raios cantos)	Fresa 2 gumes metal duro	
Quebrar arestas com fresa de U	Fresa 2 gumes metal duro	
Ponteamento S, T, Q	QBA	
Furação (pontear) S, T, Q	Broca Helicoidal aço rápido	
Roscagem c/ macho S	Macho	
Desbaste Topo e Lateral de V	Fresa 2 gumes metal duro	
Mandrilagem T	Mandril aço rápido	
Acabamento lateral P e R	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento dos furos O e N	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento de topo B e C	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento de topo e lateral de D, F, O, U e V	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento de topo e lateral furo O	Fresa 2 gumes metal duro	
Acabamento de topo e lateral D e U	Fresa 2 gumes metal duro	
Quebrar arestas A, G, K, T e V	QBA	
Acabamento lateral G e K	Fresa 2 gumes metal duro	

<b>Nome:</b> 005.14.001.001		<b>Material:</b> Alumínio AW 6082	<b>Data:</b> 26/05/17
<b>Responsável:</b> Cláudio Neves			
<b>Isostatismo</b>			
			
<b>Fase 20</b>			
<b>Máquina:</b> Fresadora CNC 3 Eixos			
<b>Operações</b>	<b>Ferramentas</b>	<b>Isostatismo</b>	
Facejamento topo (debaste) de A	Fresa de pastilhas (roca)		
Desbaste Topo e Lateral de A e B	Fresa 2 gumes metal duro		
Acabamento de forma de B	Fresa de forma		
Acabamento de topo e A	Fresa 2 gumes metal duro		



Neste caso, a **ficha de fase** vai funcionar como um método para organizar as informações sobre cada operação que vai ser realizada no decorrer desta fase, de maneira simples e compreensível para qualquer operador CNC.

Deve representar e demonstrar todo o processo de maquinagem, qual as superfícies a serem maquinadas e quais os parâmetros associados a cada operação.

#### Ficha da Fase 10

<b>NºFase:</b>	10	<b>Máquina</b>				<b>Página:</b>	1/6
<b>Nome:</b>	005.14.001.001	Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)				<b>Data:</b>	26/05/17
<b>Material:</b>	Alumínio AW 6082	<b>Dispositivo de aperto</b>				<b>Responsável</b>	
<b>Cadência</b>	900 peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
<b>Operações de maquinagem</b>			<b>Dados de corte</b>			<b>Ferramentas</b>	
<b>Nº</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Vc m/min</b>	<b>n rpm</b>	<b>Vf mm/min</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Controlo</b>
1	A	Facejamento	1385	7000	5500	Fresa de pastilhas Ø63	
2	A, B, E, F, P e R	Fresagem topo e lateral em desbaste	697	18500	12000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
3	A	Fresagem topo em desbaste	697	18500	12000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
4	R, K e G	Fresagem lateral em desbaste	829	22000	8500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
5	B e C	Fresagem topo e lateral em desbaste	754	20000	9000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
6	E	Fresagem de contorno de forma em acabamento	236	7500	1500	Fresa de forma raio exterior 10 aço rápido	
7	H, I, J, N e O	Furação	352	7000	2000	Broca Helicoidal Aço rápido Ø16	
8	J, I e H	Fresagem topo e lateral do furo em desbaste	301	8000	3000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
9	N e O	Fresagem topo e lateral do furo em desbaste	301	8000	3500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
10	H	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento	226	6000	1500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
11	O	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento	301	8000	1000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Micrómetro Interiores
12	I	Escarear furo	565	15000	5500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	

Ficha da Fase 10 (continuação)

<b>NºFase:</b>	10	<b>Máquina</b>				<b>Página:</b>	2/6
<b>Nome:</b>	005.14.001.001	Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)				<b>Data:</b>	26/05/17
<b>Material:</b>	Alumínio AW 6082	<b>Dispositivo de aperto</b>				<b>Responsável</b>	
<b>Cadência</b>	900 peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
<b>Operações de maquinagem</b>			<b>Dados de corte</b>			<b>Ferramentas</b>	
<b>Nº</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Vc m/min</b>	<b>n rpm</b>	<b>Vf mm/min</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Controlo</b>
13	N	Escarear furo	565	15000	5500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	
14	J	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento (favor)	188	5000	500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Micrómetro de Interiores
15	J	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento (contra)	188	5000	500	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Micrómetro de Interiores
16	L	Fresagem do rasgo em acabamento	236	1500	500	Fresa em T Ø50 aço rápido	Paquímetro
17	H	Roscagem Interior c/ buril	471	5000	400	Buril (passo 1,5)	
18	H	Roscagem Interior c/ buril	471	5000	400	Buril (passo 1,5)	
19	D e M	Fresagem topo e lateral em desbaste	301	12000	2000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
20	U	Fresagem topo e lateral em desbaste	377	15000	3000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
21	F	Fresagem topo e lateral em desbaste	452	18000	4500	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
22	F	Fresagem topo e lateral em desbaste	452	18000	4500	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
23	U	Fresagem topo e lateral em desbaste (restante)	188	15000	2000	Fresa 2 gumes Ø4 raio 0,2 metal duro	
24	U	Quebrar arestas c/ fresa	188	15000	3000	Fresa 2 gumes Ø4 raio 0,2 metal duro	



Ficha da Fase 10 (continuação)

NºFase:	10	Máquina				Página:	3/6
Nome:	005.14.001.001	Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)				Data:	26/05/17
Material:	Alumínio AW 6082	Dispositivo de aperto				Responsável	
Cadência	900 peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem				Dados de corte		Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
25	S e T	Ponteamento	113	6000	150	QBA Ø6 45°	
26	S	Ponteamento	113	6000	150	QBA Ø6 45°	
27	Q	Ponteamento	113	6000	150	QBA Ø6 45°	
28	T	Furação em desbaste	147	6000	400	Broca Helicoidal metal duro Ø7,8	
29	S	Furação em desbaste	128	4000	1000	Broca Helicoidal metal duro Ø10,2	
30	S	Furação em desbaste	128	4000	1000	Broca Helicoidal metal duro Ø10,2	
31	Q	Furação em acabamento	44	7000	200	Broca Helicoidal metal duro Ø2	Calibre Ø2
32	S	Roscagem Interior c/ macho	23	600	1000	Macho (passo 1,75)	
33	S	Roscagem Interior c/ macho	23	600	1000	Macho (passo 1,75)	Micrómetro de roscas
34	V	Fresagem topo e lateral em desbaste	151	6000	2000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
35	V	Fresagem topo e lateral em desbaste	151	6000	2000	Fresa 2 gumes Ø8 metal duro	
36	T	Mandrilagem 8H7	6	230	90	Mandril 8H7	Calibre Tampão Ø8H7

Ficha da Fase 10 (continuação)

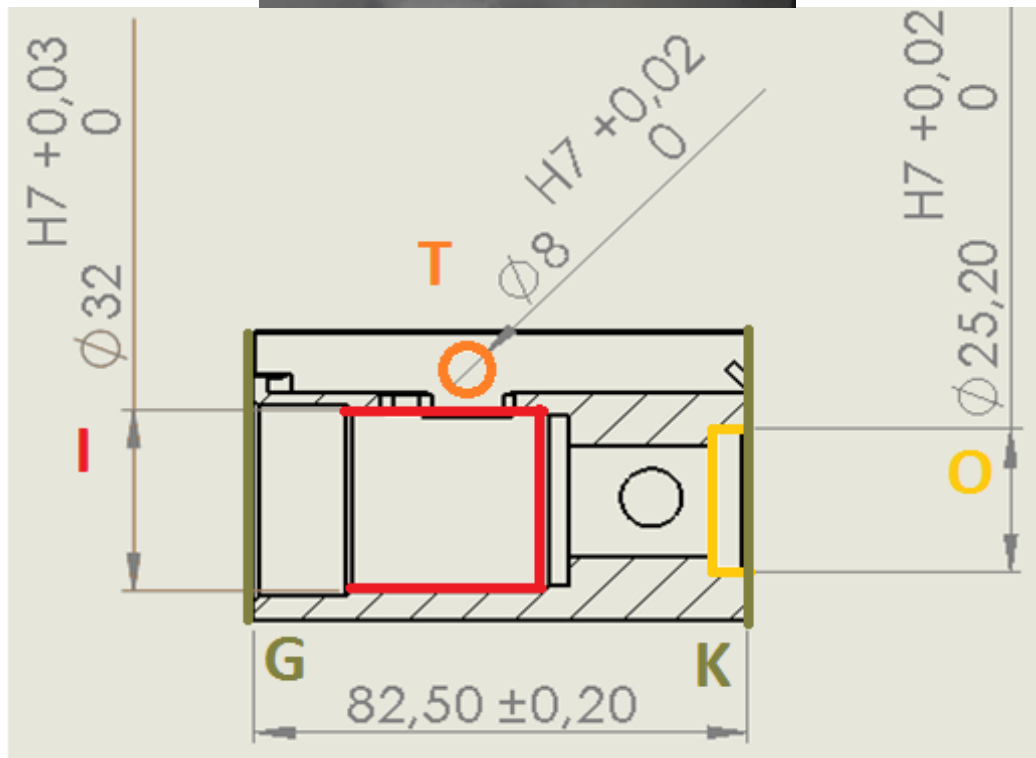
<b>NºFase:</b>	10	<b>Máquina</b>				<b>Página:</b>	4/6
<b>Nome:</b>	005.14.001.001	Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)				<b>Data:</b>	26/05/17
<b>Material:</b>	Alumínio AW 6082	<b>Dispositivo de aperto</b>				<b>Responsável</b>	
<b>Cadência</b>	900 peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
<b>Operações de maquinação</b>			<b>Dados de corte</b>			<b>Ferramentas</b>	
<b>Nº</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Vc m/min</b>	<b>n rpm</b>	<b>Vf mm/min</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Controlo</b>
37	P e R	Fresagem topo e lateral em acabamento (favor)	226	6000	1500	Fresa 2 gumes Ø12 raio 0,5 metal duro	Paquímetro
38	P e R	Fresagem topo e lateral em acabamento (contra)	226	6000	1500	Fresa 2 gumes Ø12 raio 0,5 metal duro	Paquímetro
39	A	Fresagem lateral em acabamento	283	7500	2000	Fresa 2 gumes Ø12 raio 0,5 metal duro	Paquímetro
40	I	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento	226	6000	1500	Fresa 2 gumes Ø12 raio 0,5 metal duro	Micrómetro de Interiores
41	N	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento	188	5000	1000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Micrómetro de Interiores / Paquímetro
42	B e C	Fresagem topo e lateral em acabamento	188	6000	16000	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	Paquímetro
43	F	Fresagem topo e lateral em acabamento	157	5000	800	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	
44	F	Fresagem topo e lateral em acabamento	157	5000	800	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	
45	V	Fresagem topo e lateral em acabamento	157	5000	400	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	Paquímetro

## Ficha da Fase 10 (continuação)

<b>NºFase:</b>	10	<b>Máquina</b>				<b>Página:</b>	5/6
<b>Nome:</b>	005.14.001.001	Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)				<b>Data:</b>	26/05/17
<b>Material:</b>	Alumínio AW 6082	<b>Dispositivo de aperto</b>				<b>Responsável</b>	
<b>Cadência</b>	900 peças	Prensa mecânica				Cláudio Neves	
<b>Operações de maquinação</b>			<b>Dados de corte</b>			<b>Ferramentas</b>	
<b>Nº</b>	<b>Referência</b>	<b>Tipo</b>	<b>Vc m/min</b>	<b>n rpm</b>	<b>Vf mm/min</b>	<b>Ferramenta</b>	<b>Controlo</b>
46	O	Fresagem topo e lateral do furo em acabamento	157	5000	600	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	Micrómetro de Interiores
47	V	Fresagem topo e lateral em acabamento	157	5000	400	Fresa 2 gumes Ø10 metal duro	Paquímetro
48	M	Fresagem topo e lateral em acabamento	75	6000	1000	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	Paquímetro
49	U	Fresagem lateral em acabamento	88	7000	1000	Fresa 2 gumes Ø4 metal duro	Paquímetro
50	K	Quebrar arestas c/ QBA	283	1500 0	1500	QBA Ø6 45°	
51	G	Quebrar arestas c/ QBA	283	1500 0	1500	QBA Ø6 45°	
52	V e S	Quebrar arestas c/ QBA	283	1500 0	1500	QBA Ø6 45°	
53	V e S	Quebrar arestas c/ QBA	283	1500 0	1500	QBA Ø6 45°	
54	T	Quebrar arestas c/ QBA	283	1500 0	1500	QBA Ø6 45°	
55	T	Quebrar arestas c/ QBA	283	1500 0	1500	QBA Ø6 45°	
56	A	Quebrar arestas c/ QBA	151	8000	15000	QBA Ø6 45°	
57	K e G	Fresagem lateral em acabamento	113	6000	2000	Fresa 2 gumes Ø12 metal duro	Paquímetro

Ficha da Fase 10 (continuação)

NºFase:	10	Máquina	Página:	6/6
Nome:	005.14.001.001	Fresadora CNC (DMG Mori Milltap 700)	Data:	26/05/17
Material:	Aluminio AW 6082	Dispositivo de aperto	Responsável	
Cadência	900 peças	Prensa mecânica	Cláudio Neves	
Isostatismo				

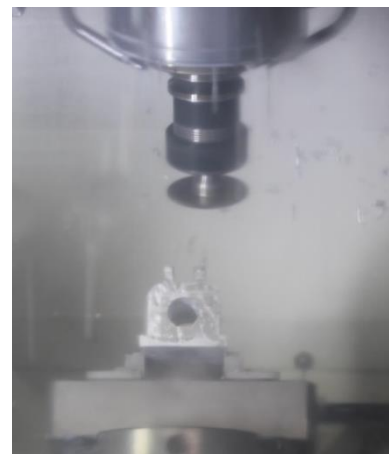


A peça é demasiado complexa para definir numa ficha de fase, portanto as restantes cotas que não estão representadas na ficha de fase devem ser verificadas segundo o especificado no desenho técnico da peça (figura92).

## Considerações sobre a Fase 10

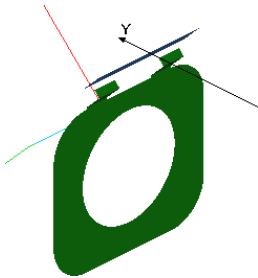
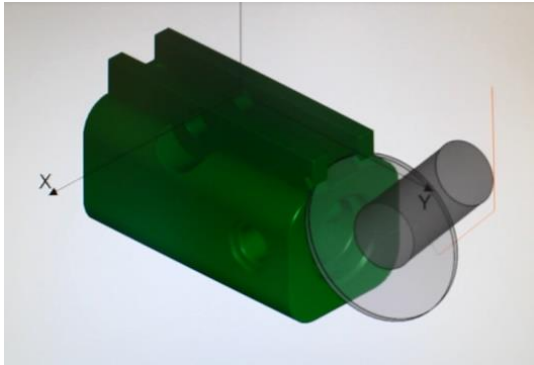
Nº Operação	Considerações
6	<p>Para diminuir o tempo de maquinação utilizamos uma fresa de forma especial para fazer o raio exterior.</p> <p>Para o raio exterior ficar bem acabado nesta operação damos duas passagens:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 0,3mm acima da cota para desbaste</li> <li>2. Na cota para acabamento.</li> </ol>
7	Esta operação serve para aliviar os esforços futuros ao desbastar os furos. Assim a maior parte desses esforços é reduzida uma vez que o material já foi tirado pela broca
12	<p>Nestes passos efetuamos o chanfro utilizando uma fresa sem raio de canto, por isso temos que dar incrementos muito pequenos para simular o chanfro e o resultado final é um chanfro rugoso.</p> <p>Optou-se por esta solução para evitar mais trocas de ferramentas e uma vez que o resultado final estava dentro das tolerâncias e expectativas do cliente.</p> <p>Também se colocou um diâmetro virtual maior que o real (12,1) para que a fresa não tocasse nas paredes dos furos que já tinham sido pré-acabados.</p>
14	Como foi explicado no caso de estudo anterior, por vezes é necessário realizar uma operação com o corte a favor e em seguida contra para garantir melhor acabamento e minimizar possíveis excessos de material.

- 16
- Para evitar uma maquinação mais complexa, escolheu-se um disco de corte em T com a espessura do rasgo e maquinou-se assim, uma vez que as tolerâncias do rasgo não são relevantes para a funcionalidade (**figura 96**).
- Esta operação foi a mais diferente de programar, uma vez que o plano da maquinação não é nenhum dos convencionais. Por isso teve que criar um novo plano normal à superfície a ser maquinada.



**Figura 96 - Fresagem com disco em T**

## Considerações sobre a Fase 10 (continuação)

Nº Operação	Considerações
	<p>A maquinação recorrendo a uma fresa em T tem outra limitação inerente ao <i>software</i>, que não deixa maquinar o rasgo caso exista alguma superfície entre o movimento perpendicular da ferramenta e o rasgo. Por isso, para esta operação foi necessário criar superfícies correspondentes aos limites inferiores e laterais do rasgo para servirem como guias da maquinação (<b>figura 97a</b>)</p> <p>Para confirmar a operação programada, foi criada uma ferramenta com as dimensões da real recorrendo ao <i>software</i> e correu-se uma simulação (utilizando as superfícies criadas como guias, mas mostrando também a toda a peça para verificar se o programa não iria maquinar nada além do rasgo (<b>figura 97b</b>).</p>
16 (continuação)	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p><b>a) Superfícies para maquinar o rasgo</b></p> </div> <div style="text-align: center;">  <p><b>b) Simulação da operação para maquinar o rasgo</b></p> </div> </div>

**Figura 97 - Programação da operação do rasgo**

17	Como estamos perante a roscagem de um diâmetro interior com uma dimensão considerável, recorremos ao uso de um buril com passo 1,5 para maquinar a rosca
18	Para garantir que a rosca está bem maquinada, repete-se o passo anterior.
23	Esta operação é bastante interessante, uma vez que é programada a partir de uma operação anterior (20) e da superfície a ser maquinada na operação anterior (U). O <i>software</i> calcula quais os elementos que não foram maquinados na operação anterior (neste caso, devido ao diâmetro da fresa não permitir a maquinação dos raios de canto) e elabora uma nova operação cujo elemento a maquinar é o mesmo (U) mas cuja trajetória só vai maquinar o material por maquinar na operação 20.
24	Mais uma vez recorre-se de uma fresa para quebrar as arestas, mas neste caso com raio de rasto para garantir um melhor acabamento e para possibilitar a realização do chanfro ao longo do elemento a ser maquinado, uma vez que o processo normal utilizando o QBA não iria quebrar a aresta ao longo de todo o elemento.

### Considerações sobre a Fase 10 (continuação)

Nº Operação	Considerações
28	Como o material é alumínio, a broca é de metal duro e a operação serve para aliviar futuros esforços de maquinação, podemos realizar o furo de uma só passagem.
32	Roscagem do furo com macho de roscar.
39	Nesta operação acaba-se a face superior, mas com a fresa a maquinar lateralmente. Assim a maquinação é realizada numa só passagem, evitando-se assim passagens adicionais inerentes à maquinação de topo. O principal objetivo é diminuir os tempos de maquinação.
40	Acabamento dos furos e retirar possíveis rebarbas deixadas devido à maquinação dos chanfros
42	Acabamento das faces do rebaixo com a mesma fresa para evitar diferenças nas marcas deixadas pelas operações anteriores
46	Esta operação foi colocada nesta ordem, para possibilitar a maquinação nas várias faces e que permitisse o menor tempo possível nos movimentos os eixos de rotação A e C.
48	Para acabar os raios que a operação 43, não acabou
50	Ao quebrar as arestas com o QBA, também vai maquinar material que ainda não tinha sido desbastado, designadamente perto na face inferior. Isto vai permitir que não seja necessária uma segunda operação de quebrar arestas numa fase posterior, diminuindo o tempo de maquinação total. Esta operação só é viável uma vez que o material é alumínio.

A ficha de fase deve ser sempre acompanhada pelo desenho técnico da peça (**figura 92**), que deverá complementar no auxílio do controlo dimensional e geométrico das superfícies maquinadas representadas.

Este complemento torna-se necessário para simplificar e diminuir a informação contida na ficha de fase, que, para uma peça para maquinação CNC complexa como a em questão, se torna confusa e pouco intuitiva.

**Em anexo** é apresentado um relatório das diferentes operações realizadas por sequência (**anexo 5**) e uma ficha com as características específicas de uma determinada operação desta peça (**anexo 6**).

#### 5.4.4. Resultados

Para verificar se o objetivo de otimizar o processo de maquinação foi alcançado, procedeu-se à comparação dos resultados obtidos e dos resultados do processo existente.

Estes dados foram obtidos através do cálculo da média do tempo de maquinação, dado pela máquina, das primeiras 10 peças maquinadas após o programa estar terminado e validado.

Também temos acesso ao tempo de maquinação calculado pelo *software* que neste caso não representa a realidade da maquinação.

Os dados do processo utilizado anteriormente foram dados pelo operador responsável pelo mesmo, sendo que estamos perante um valor aproximado.



### Comparação dos tempos de maquinagem

#### 1. Atuais:

Tempo do <i>software</i>	Tempo real	Tempo de troca de peça	Tempo Peça
9min 50seg	13min05seg	1min	14min

#### Tempo total para a produção da encomenda:

$$TempoTotal = TempoPeça(min) * 900 = 12600 \text{ min}$$

$$N^{\circ} \text{ dias de trabalho estimado} = \frac{TempoTotal(min)}{8 * 60} = 26 \text{ dias e 2 horas}$$

#### 2. Anteriores:

O tempo de maquinagem do processo anterior aqui utilizado é uma aproximação dada pelo operador CNC do processo utilizado anteriormente, uma vez que não há registos do processo.

$$TempoTotal = TempoPeça(min) * 900 = 16 \text{ min} * 900 = 14400 \text{ min}$$

$$N^{\circ} \text{ dias de trabalho estimado} = \frac{TempoTotal(min)}{8 * 60} = 30 \text{ dias}$$

#### 3. Resultados

Realizando uma comparação entre o tempo antes utilizado com o obtido podemos calcular a percentagem dos ganhos obtidos com as alterações implementadas.

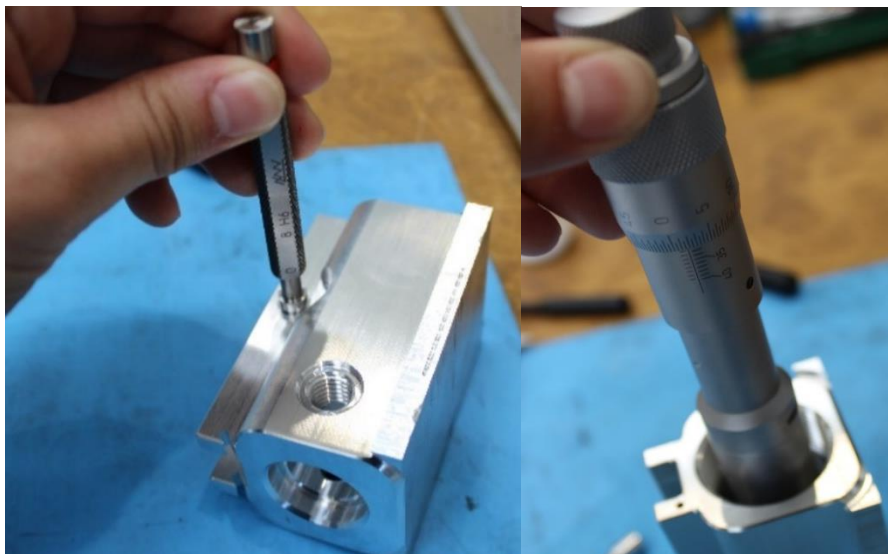
$$Melhoria \text{ obtida}(\%) = \left(1 - \frac{12600}{14400}\right) * 100 \cong 14 \%$$

#### 5.4.5. Conclusões

Com as alterações ao sistema de aperto e programa, conseguiu-se obter uma **diminuição de 14%** do tempo anterior, o que demonstra que o objetivo principal da otimização do processo foi atingido e as peças maquinadas estavam a ser maquinadas sem nenhum problema ou defeito.

Embora o caso de estudo só englobe o tempo de programação e validação do programa (tempo que corresponde à maquinagem das primeiras 20 peças), é importante salientar a necessidade o **controlo sistemático das peças a ser maquinadas**, dando importância adicional às cotas toleranciadas e o controlo do estado das ferramentas devido à probabilidade que com o desgaste progressivo, embora, como a peça é de alumínio, o desgaste efetuado às ferramentas de metal duro utilizadas é mínimo e só deve influenciar após a maquinagem de algumas dezenas de peças. Por isso, o fator mais provável a causar erros de maquinagem é o aperto da peça, embora seja recomendado efetuar o controlo dimensional para todas as peças maquinadas.

O **controlo dimensional** efetuado é adequado para a verificação da peça e permite a medição em menos tempo se em comparação com uma CMM. Como os elementos que apresentam tolerâncias mais apertadas nesta peça são os furos, podemos efetuar o controlo recorrendo a micrómetros de interiores e a calibres tampão que garantem medições de até 0.005mm (**figura 98**). Para as tolerâncias restantes e dimensões gerais o paquímetro ou o micrómetro de exteriores são instrumentos perfeitamente válidos para o controlo



**Figura 98 - Controlo dimensional manual**

Este caso de estudo também permitiu o contacto com algumas situações mais incomuns da **maquinagem a 5 eixos**, o que trouxe uma nova perspetiva sobre as problemáticas que se podem aparecer na maquinação com auxílio do CAD/CAM. Também o contacto com a tecnologia de 5 eixos traz novo conhecimento que será útil no futuro.

Dado isto, podemos considerar que os **objetivos foram atingidos** e que as melhorias atingidas são satisfatórias.

## **5.5. Maquinagem de peça simples em torno**

### **5.5.1. Introdução**

Embora não tenha sido o principal foco durante o estágio, a inclusão sobre um caso de estudo sobre o torno CNC pareceu um passo necessário para demonstrar e complementar o trabalho efetuado em fábrica.

Por isso abordou-se a maquinação de uma fase de uma peça simples de torno para ilustrar o processo de torneamento e os principais pontos que o caracterizam.

Os principais objetivos deste caso de estudo são a compreensão das etapas básicas da maquinação num torno CNC e as suas limitações e conhecer o MasterCam que é *software* utilizado nos tornos CNC na empresa.

### **5.5.2. Preparação da produção**

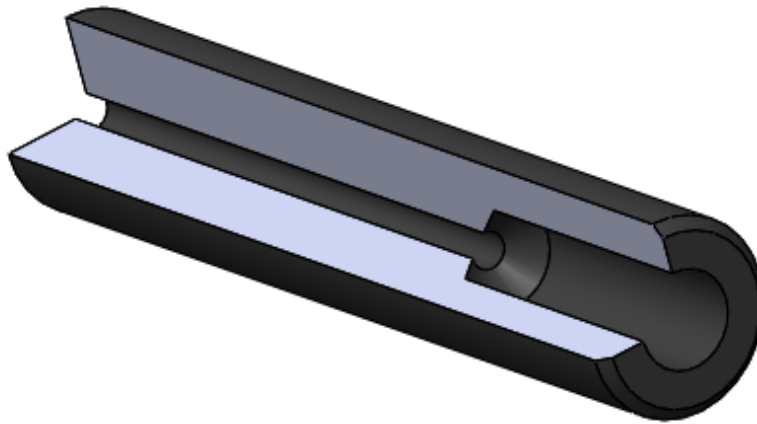
Neste caso de estudo é necessário o fabrico de 4 peças com a referência DJY2000\_G250\_039\_R000 em Aço C265.

O **bruto** utilizado foi um perfil redondo (cilíndrico) de diâmetro 20mm e com comprimento 250mm, suficiente para fazer até 5 peças caso exista algum erro na maquinação.

A sobre-espessura do bruto está sobredimensionada tanto do diâmetro, o que leva à necessidade de passos adicionais de desbaste, como no comprimento, que permite a maquinação de peças suplementares.

O comprimento adicional do perfil é pedido com frequência uma vez que é recorrente que na maquinação nos tornos ocorreram algumas falhas na primeira peça:

- Marcação da peça devido a demasiada pressão no aperto das buchas.
- Limitações nos pós-processadores do *software* para a linguagem da máquina, que na maior parte das vezes necessitam de ser efetuadas alterações do próprio código ISO gerado para a máquina.
- Deformação do material – Para diâmetros inferiores a 6mm é recorrente acontecer e é necessário ter cuidado adicional.



**Figura 99 - Modelo 3D com corte da peça do caso de estudo 5**

Como estamos perante **uma peça cilíndrica ou de revolução**, a forma mais rápida e precisa para o seu fabrico é a maquinação num torno CNC.

Neste caso, a peça foi maquinada no torno CNC Doosan Lynx 220 LSY devido à disponibilidade do mesmo.

Antes de iniciar a maquinação é necessário fazer um estudo da peça para determinar as **etapas necessárias para a sua maquinação**, sendo que as etapas determinadas foram:

- 1) Maquinação de desbaste e acabamento em torno CNC das principais características da peça;
- 2) Maquinar a face correspondente ao local de aperto da primeira fase e o seu acabamento;
- 3) Maquinação do furo passante Ø1.5mm recorrendo a uma máquina de electroerosão.

### 5.5.3. Maquinação

O **sistema de aperto** utilizado foi a bucha hidráulica (**figura 100**) já incorporada da máquina que permite a fixação de praticamente qualquer peça cilíndrica, podendo ser complementado por outros acessórios.

O maior cuidado que se deve ter ao utilizar este sistema é com a definição da pressão que irá ser exercida pela bucha, quando apertar na peça.

Este passo pode significar a deformação da peça (caso excesso de pressão) ou na possibilidade de vibração excessiva ou mesmo da peça se desprender (no caso de pouca pressão), que pode levar à danificação ou erros geométricos da peça.

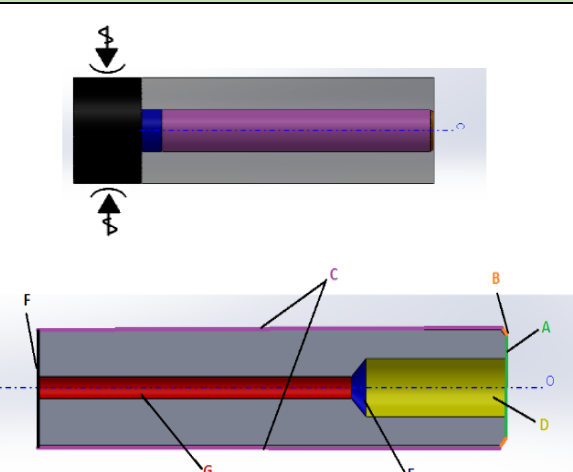
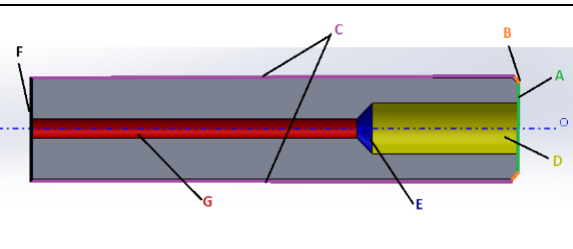
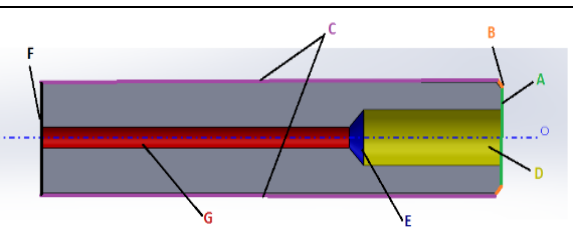


**Figura 100 - Aperto do bruto no torno CNC**

Procede-se à elaboração de uma **sequência de maquinação** a título académico, uma vez que só se acompanhou a primeira fase de maquinação da peça em questão.

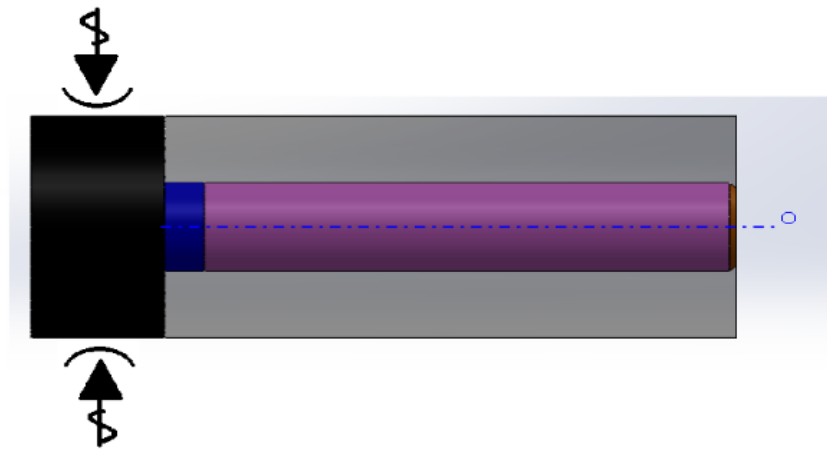
Uma vez que se trata de uma peça simples, a sua sequência de maquinação e respetivos documentos, tornam-se muito intuitivos e fáceis de compreender, em comparação com outras mais complexas.

É interessante notar que na Fase 30, optou-se por recorrer a uma electroerosora para maquinar o furo com diâmetro 1.5mm, uma vez que a maquinação do mesmo no torno seria menos precisa e até mais demorada uma vez que se teria de realizar essa operação com cuidados acrescidos.

Sequência de Maquinagem		
Nome: DJY2000_G250_039_R000	Material: Aço C265	Data: 01/06/17
Responsável: Cláudio Neves		
Fase 10		
Máquina: Torno CNC (Doosan Lynx 220 LSY)		
Operações	Ferramentas	Desenho + Isostatismo
Facejamento em desbaste de A	Ferro de torneiar	
Desbaste cilíndrico de C	Ferro de torneiar	
Acabamento exterior de C	Ferro de torneiar	
Facejamento e chanfro em acabamento de A e B	Ferro de torneiar	
Ponteamento de D	QBA	
Furação de D e E	Broca helicoidal	
Sangramento em F	Ferro de sangrar	
Fase 20		
Máquina: Torno CNC ou Electroerosão fio ou Torno/Retificadora convencional		
Facejamento em acabamento de F		
Fase 30		
Máquina: Electroerosora de penetração		
"Furação" de G		

Já foi mencionado que o diâmetro do **bruto foi sobredimensionado** ( $\varnothing$  20mm) em relação ao diâmetro final da peça ( $\varnothing$  8mm), o que implica num maior numero de passos de desbaste que envolve maior desgaste da ferramenta.

A **figura 101** é bastante ilustrativa desse sobredimensionamento, mas também representa um outro detalhe que os operadores de torno CNC têm que ter atenção. Na figura a azul está representado o material que o ferro de sangrar maquina para separa a peça do restante material. Se a peça não for desbastada considerando esse comprimento adicional a operação de sangramento pode ficar comprometida, podendo significar a danificação do ferro de sangrar.



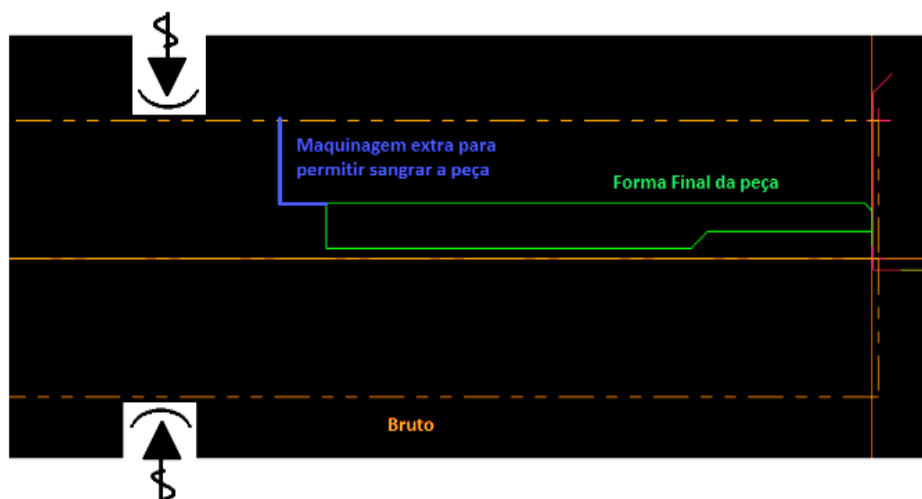
**Figura 101 - Representação da peça a maquirar no bruto**

Outro aspeto interessante são as **diferenças na programação** entre a fresadora CNC e o torno CNC, no qual, este ultimo, utiliza o perfil da peça ao invés do desenho 3D.

A **figura 102** apresenta o ambiente básico de um operador de torno CNC, no qual está representado o material de partida a laranja e o perfil da peça a maquirar a verde.

No decorrer da programação, as operações que vão sendo realizadas vão sendo subtraídas ao bruto até que o material a laranja corresponda à peça fina a verde (**anexo 7**).

O operador tem que ter o cuidado adicional de maquirar além do perfil da peça final a verde (a azul) para ser possível realizar o sangramento da peça.



**Figura 102 - Ambiente de programação de torno com Mastercam**

Além da **sequência de maquiragem** elaborou-se uma ficha da fase 10, a qual representa todas as operações efetuadas, as superfícies a serem maquiradas em cada operação, qual a ferramenta a ser utilizada, quais as cotas a serem controladas e a que instrumento de medição recorrer para esse controle.

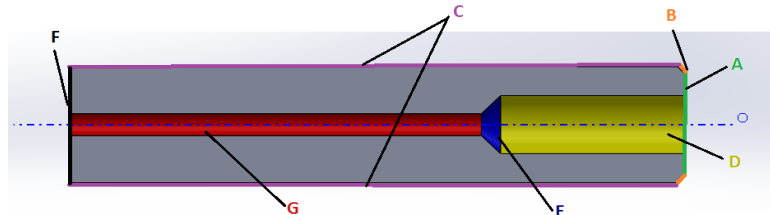
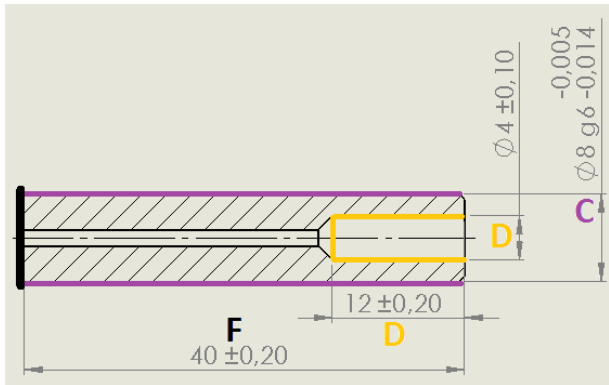
Esta ficha permite ao operador a maquiragem das peças, mesmo sem tendo grande conhecimento do programa das mesmas, uma vez que a ficha elaborada segue as operações programadas.

Ficha de Fase 10

NºFase:	10	Máquina				Página:	1/2
Nome:	DJY2000_G2 50_039_R000	Torno CNC (Doosan Lynx 220 LSY)				Data:	01/06/17
Material	Aço C265	Dispositivo de aperto				Responsável	
Cadência	4 peças	Bucha Hidráulica de 3 pontos				Cláudio Neves	
Operações de maquinagem			Dados de corte			Ferramentas	
Nº	Referência	Tipo	Vc m/min	n rpm	Vf mm/min	Ferramenta	Controlo
1	A	Facejamento em desbaste	50	2000*	400	Ferramenta de carbonetos c/ raio 0,8	
2	C	Desbaste cilindro	50	2000*	400	Ferramenta de carbonetos c/ raio 0,8	
3	C	Acabamento exterior	75	3000*	300	Ferramenta de carbonetos c/ raio 0,4	Micrómetro de exterior
4	A e B	Facejamento e chanfro em acabamento	75	3000*	300	Ferramenta de carbonetos c/ raio 0,4	
5	D	Pontear	24	1300	260	QBA Ø6mm 45°	
6	D e E	Furação	16	1300	130	Broca helicoidal de Ø4mm	Paquímetro
7	F	Sangramento	19	2000	40	Ferramenta de sangrar 3mm e 15° de inclinação	Paquímetro

**Nota\*:** A rotação do fuso do torno (n) varia de acordo com o diâmetro para manter sempre a mesma Velocidade de Corte (Vc).

Ficha de fase 10 (continuação)

NºFase:	10	Máquina	Página:	2/2
Nome:	DJY2000_G250 _039_R000	Torno CNC (Doosan Lynx 220 LSY)	Data:	01/06/17
Material:	Aço C265	Dispositivo de aperto	Responsável	
Cadência	4 peças	Bucha Hidráulica de 3 pontos	Cláudio Neves	
ISOSTATISMO				
				
				

#### 5.5.4. Conclusões

O erro é uma parte natural do processo de maquinação, mas que deve ser evitada ao máximo. Mas neste caso em particular, não foi possível evitar um erro na maquinação da primeira peça, que levou à sua não conformidade, uma vez que a mesma saltou durante a operação de sangramento e ficou com uma marca na superfície (figura 103).

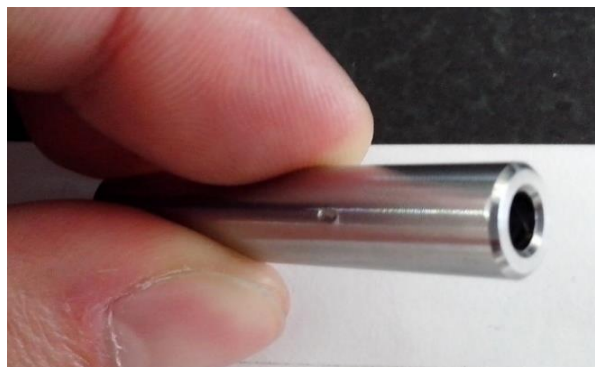


Figura 103 - Peça com defeito devido a erro de maquinação



O motivo para este erro foi muito claro, uma vez que a ferramenta de sangrar efetuou a operação de corte na mesma velocidade programada para o avanço rápido.

Este erro deveu-se a um erro na compilação do código máquina gerado pelo pós-processador, que não colocou o código correspondente à velocidade de corte na linha certa e assim a máquina considerou a velocidade de avanço. Isto é resultado de o pós-processador utilizado não ser 100% compatível com a máquina e, por isso, é necessário modificar o programa gerado por vezes.

O código foi então modificado e as restantes peças foram maquinadas sem qualquer tipo de problema.

Conclui-se então que as operações de torno são abordadas de maneira um pouco diferente, tanto devido à própria tecnologia como ao *software*.

As diferenças são a utilização de um perfil da peça a maquinar, geralmente em corte para representar os furos, invés do CAD 3D completo utilizado na fresagem e ser a rotação da peça que vai permitir a maquinação, o que limita as trajetórias é basicamente a dois eixos e simplifica o código gerado.

Este código que é gerado pela máquina tem muito mais semelhanças ao código que o operador teria que escrever manualmente (podendo haver simplificações ao utilizar ciclos de maquinação nas operações de desbaste).

Esta semelhança não existe nas fresadoras uma vez que os pós-processadores calculam a trajetória por interpolações, o que leva a que o código criado correspondente até a uma peça relativamente simples, possa ter mais que 1000 linhas de código, o que torna o código muito pouco otimizado e difícil de interpretar.

Este fator é particularmente visível na facilidade da alteração do código gerado neste caso de estudo, no qual foi apenas necessário acrescentar um comando correspondente à velocidade de corte numa única linha.

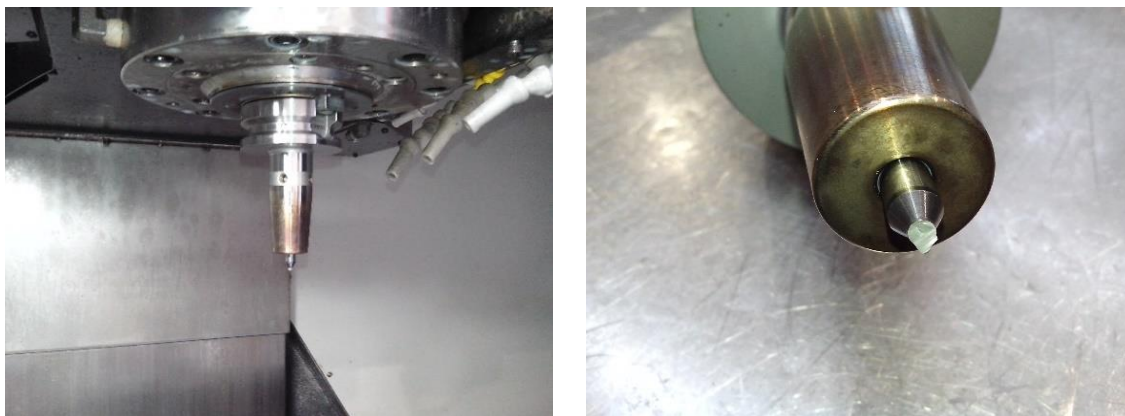
Não foi realizado a maquinação do **furo G** em torno, dado que as suas dimensões reduzidas tornam o processo demorado em torno, sendo que a empresa dispõe de tecnologias mais adequadas para o efeito, como a electroerosão.

Embora tenha-se abordado uma peça simples, esta peça foi bastante ilustrativa dos procedimentos gerais utilizados na maquinação usando o torno CNC e de algumas problemáticas associadas.

## 5.6. Caso da quebra de ferramenta

### 5.6.1. Introdução

Este caso de estudo tem origem na quebra de uma fresa de 2 gumes de Ø3 de metal duro (**figura 104**), enquanto se maquinava a peça com a referência 576294100 em aço C265.



**Figura 104 - Ferramenta quebrada**

A quebra ocorreu durante a maquinação do raio de canto da peça (**figura 105**), levando à projeção de parte da ferramenta, que felizmente não marcou a peça, sendo que foi possível continuar a sua maquinação apenas após a troca de ferramenta.

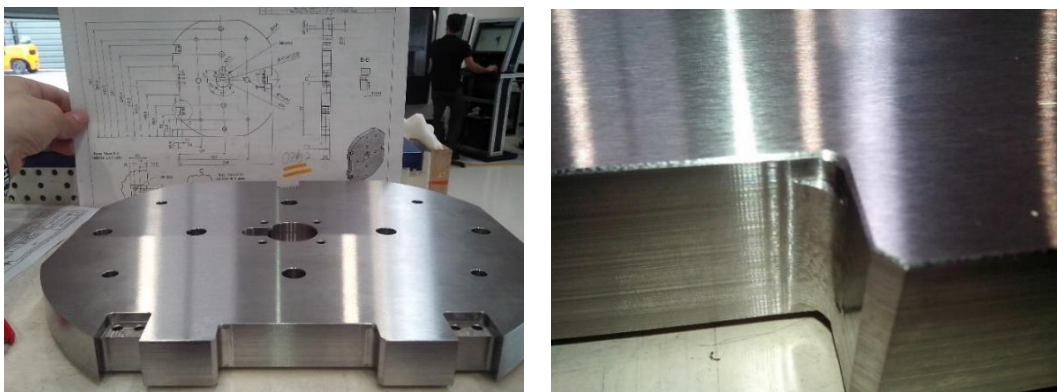


Figura 105 - Elemento maquinado durante a quebra da ferramenta

Mesmo não tendo existido consequências, considerou-se uma boa oportunidade para refletir na problemática associada à quebra de ferramenta, nas suas causas e nos seus efeitos.

### 5.6.2. Análise

Procedeu-se a um levantamento de todas as **principais causas**, que podem levar à quebra de ferramenta.

- Ferramenta previamente danificada ou desgastada;
- Excesso do avanço programado XY;
- Demasiado incremento Z;
- Velocidade de Rotação mais lenta que o recomendado;
- Estratégia de maquinagem não adequada;
- Material a maquinar demasiado duro para a ferramenta.

Das causas consideradas e tendo em conta o contexto específico do caso de estudo, as **causas mais prováveis** de terem influenciado na quebra da ferramenta em estudo foram.

- Incremento em Z
  - O incremento em Z programado era de 0,3mm para um programa de contorno para maquinar um elemento de raio 2mm, que não é um incremento exagerado para a operação em causa.
- Velocidade de Rotação
  - A velocidade de rotação (n) estava definida em 8000rpm e a velocidade de avanço (Vf) era de 1000 mm/min. Aplicando a fórmula para achar o avanço por dente (f):

$$f = \frac{Vf}{n * n^{\circ}dentes} = \frac{1000}{8000 * 3} \cong 0,042 \text{ mm/min}$$

O avanço por dente de 0.042 mm/min está dentro dos valores normais de avanço por dente para uma fresa de Ø3 de metal duro.

- Ferramenta danificada ou gasta
  - Esta é a **causa mais provável**, uma vez que os parâmetros estavam bem dimensionados.

Neste caso específico não houve nenhuma **consequência** grave, para além do tempo perdido na troca da ferramenta uma vez que a fresa estava a realizar uma operação de desbaste quando partiu e não danificou nem marcou a peça.

Mas caso a peça fosse danificada, especialmente numa operação de acabamento, a peça poderia ter que ser recomeçada ou então reaproveitada, o que iria implicar um aumento muito significativo no tempo de maquinagem.

### 5.6.3. Sugestões de melhoria

Com a análise realizada anteriormente, elaborou-se duas propostas de melhoria para evitar a quebra de ferramenta durante a maquinação. [58]

- Controlo do estado da ferramenta antes do início da maquinação.
  - Esta ação era facilitada, caso existisse uma ferramentaria (**figura 106**) dedicada à gestão, controlo e reparação das ferramentas existente na fábrica
- Controlo do tempo de vida da ferramenta e acompanhamento da mesma.
  - Também facilitado recorrendo à ferramentaria a qual teria responsabilidade de retirar a ferramenta de circulação na fábrica quando o seu tempo de vida chegasse ao fim, de forma a evitar erros de maquinação devido à quebra dessa mesma ferramenta.



**Figura 106 - Diagrama de funções da Ferramentaria**

### 5.6.4. Conclusões

A principal conclusão a tirar deste caso de estudo é a necessidade de melhoria da gestão e acompanhamento das ferramentas, uma vez que existem sistemas que permitem uma melhor gestão das ferramentas em fábrica, prever a sua falha e nesse caso um pedido de ferramenta antes da falha da ferramenta.

Isto permite uma otimização dos tempos de maquinação uma vez que o operador/programador CNC já não necessita de se preocupar com o estado da ferramenta.

Outro facto importante, é que o operador não necessita de dar a baixa da ferramenta devido a quebra ou desgaste excessivo. Este facto leva a:

- Desresponsabilização da parte do operador, uma vez que não existe controlo do uso dado às ferramentas utilizadas;
- Probabilidade de acontecer mais erros, devido a uso impróprio das ferramentas;
- Dificuldade de garantir stock e da encomenda de ferramentas em falta sem influenciar a produção.

Por estes motivos, considera-se necessário e fundamental **mudar o sistema de gestão de ferramentas**.



## 6. Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1. Conclusões

Este estágio curricular foi abordado com o objetivo de aprender o máximo possível das tecnologias CNC atualmente disponíveis no mercado, os processos utilizados na produção e o primeiro contato com o mundo industrial.

Os objetivos foram claramente atingidos, tendo adquirido conhecimentos sobre a maquinagem CNC, organização e gestão de trabalho, otimização do processo CNC, tecnologias CNC em imergência e o funcionamento do mundo de trabalho

Embora não tenha sido abordado nenhum caso de estudo específico sobre a otimização da maquinagem CNC para pequenas séries, o conhecimento adquirido através do dia-a-dia na empresa foi continuamente aplicado na tentativa de melhorar processos e diminuir os tempos não-produtivos de forma a aumentar a produtividade da empresa.

Tal versatilidade, diversidade e quantidade dos projetos realizados no dia-a-dia de uma empresa metalomecânicos não poderiam ser todos abordados neste relatório, sendo assim, escolhidos casos específicos que descrevem o percurso do estágio e tentam demonstrar os conteúdos adquiridos tanto ao longo do estágio como do percurso académico.

Esta união entre os dois mundos, industrial e académico, nem sempre obteve bons resultados como é visível na elaboração dos documentos associados à maquinagem nos casos de estudo 3 e 4, o que leva à conclusão que as ferramentas standard da engenharia nem sempre podem ser aplicadas à maquinagem de CNC da forma desejável, o que se deve também ao rápido e contínuo desenvolvimento desta tecnologia.

Considera-se que existem várias melhorias que podem ser aplicadas para a otimização da produção e dos custos envolvidos, designadamente a criação de uma ferramentaria, a elaboração de uma sequência geral de fabrico e as tabelas de sequência de maquinagem e fichas de fase, que permitam, assim, padronizar processos que têm uma elevada influência do resultado da maquinagem. Também existem soluções automatizadas que poderiam trazer benefícios em alguns casos mais específicos, como a criação de uma célula automatizada para a maquinagem de séries.

Foi interessante também o contacto com a Metrologia Dimensional, mais especificamente com as CMM, que me levou a olhar de uma forma diferente para a qualidade e controlo dimensional, além de reforçar a sua importância que cada vez é maior devido às exigências de precisão por parte da indústria da metalomecânica.

Existe investimento em novas tecnologias CNC (ex: multitasking e os 5 eixos contínuos), mas falta a aposta no *know-how*, de modo a obter o máximo de rentabilidade das mesmas, talvez devido ao custo do investimento, que apresenta sempre um entrave ao avanço tecnológico, tanto no nível do equipamento CNC como na formação de pessoal especializado.

A grande conclusão a tirar com este estágio é o enorme potencial de crescimento da indústria metalomecânica de precisão em todas as suas vertentes, sendo cada vez mais de extrema importância estar atualizado das mais recentes tecnologias de maneira a assegurar melhor produtividade, rentabilidade e satisfação dos clientes.

## 6.2. Caso da quebra de ferramenta

Na sequência dos trabalhos efetuados, considera-se que existem alguns trabalhos que podem ser realizados como melhoria da empresa.

A **criação de uma ferramentaria e implementação de um sistema de controlo das ferramentas** utilizadas é um ponto que pode ser desenvolvido com vista a melhoria geral da empresa.

Esta ferramentaria podia utilizar tecnologias mais recentes como os armazéns automáticos de ferramentas e de sistemas que permitissem o acompanhamento do tempo integral de uso da ferramenta na maquinação.

**Elaboração de um esquema sequencial de fabrico** para ser utilizada como modelo para a criação de sequências de maquinação mais rentabilizadas e produtivas para qualquer tipo de peça, de modo a diminuir o número de não conformidades e auxiliar a produção da documentação necessária que caracteriza um dado processo de maquinação.

**Aplicar o conceito indústria 4.0 à maquinação CNC**, com objetivo de criar um modelo de fábrica inteligente, totalmente controlada e acessível, que garanta o armazenamento e gestão dos dados adquiridos para serem utilizados para otimizar os processos.

Realização de trabalhos em **fresadoras de 5 eixos contínuos ou multitasking**, de forma a sistematizar as etapas de maquinação para uma programação mais fácil e estudar possíveis aspetos de melhoria elaborando soluções viáveis para os mesmos.

Criação de uma **célula robotizada cooperativa** entre CNC, braços robóticos e operador, com o objetivo de aumentar a produtividade para médias e grandes séries.

Criação de um modelo de célula robotizada automática ou semi-automática, que permitisse a maquinação de diferentes componentes conforme a necessidade na empresa e sem necessidade de alteração da mesma.

## Referências

- [1]. Roe JW. English and American Tool Builders. 1<sup>st</sup> ed. New Haven, Connecticut: Yale University Press;1916.
- [2]. Lacalle NL, Lamikiz A. Machine Tools for High Performance Machining. London: Springer;2009.
- [3]. Wikipedia. Milling (Machining). [cited 2017 May 3]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Milling\\_\(machining\)#History](https://en.wikipedia.org/wiki/Milling_(machining)#History)
- [4]. Wikipedia. Automatic Lathe. [cited 2017 May 18]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic\\_lathe#Screw\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Automatic_lathe#Screw_machine)
- [5]. SME. The Father of the Second Industrial Revolution. [cited 2017 May 20]. Available from: <http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=36002&terms=father%20of%20the%20second%20industrial%20revolution>
- [6]. Wikipedia. History of numerical control. [cited 2017 May 18]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_numerical\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_numerical_control)
- [7]. Makely W, Gregory F. 50 years of technological development. Cutting Tool Engineering. 2005 Agosto, vol.57: p. 1-19
- [8]. American Wire EDM. History of EDM machining. [cited 2017 June 16]. Available from: <https://www.americanwireedm.com/edm-machining-history>
- [9]. Sandy Historical Society. A Brief Explanation of the EDM Process. [cited 2017 June 16]. Available from: <http://sandyhistorical.org/2015/07/11/edm-sans-skrillex/>
- [10]. ONA. Technological evolution of EDM. [cited 2017 June 16]. Available from: <https://www.interempresas.net/Warehouses/News/1916-Technological-evolution-of-EDM-by-penetration-ONA-machines.html>
- [11]. Hocken RJ, Pereira PH. Coordinate Measuring Machines and Systems. 2<sup>nd</sup> ed. London: CRC Press; 2012.
- [12]. Wikipedia. Universal Measuring Machine. [cited 2017 May 16]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_measuring\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_measuring_machine)
- [13]. ASME. B89 History. [cited 2017 June 10]. Available from: <https://cstools.asme.org/csconnect/FileUpload.cfm?View=yes&ID=23083>
- [14]. Bosh JA. Coordinate Measuring Machines and Systems. Dayton, Ohio: Giddings & Lewis,1995.
- [15]. Waurzyniak P. Masters of Manufacturing: David McMurtry. Manufacturing Engineering. 2008 Julho, vol.141: p.1-8
- [16]. Hexagon. CMM History. [cited 2017 April 24]. Available from: <http://support.hexagonmetrology.us/link/portal/16101/16131/Article/846/CMM-History>
- [17]. DMG Mori. [cited 2017 July 5]. Available from: <http://en.dmgmori.com/>
- [18]. DMG Mori. CTX beta 800T C. [cited 2017 June 10]. Available from: <http://en.dmgmori.com/products/lathes/turn-mill-complete-machining-centres/ctx-tc/neues-dokument/226766#Intro>
- [19]. Universidade Federal de Santa Catarina. O QUE É UM FMS?. [cited 2017 April 26]. Available from: [http://www.grima.ufsc.br/sociesc/fms2/FMS2\\_files/Page350.htm](http://www.grima.ufsc.br/sociesc/fms2/FMS2_files/Page350.htm)
- [20]. AMF. Vacuum clamping systems catalogue; 2017. [cited 2017 June 05]. Available from: <http://pdf.directindustry.com/pdf/amf-andreas-maier/magnetic-clamping-systems/9232-632227.html>
- [21]. AMF. Magnetic clamping systems catalogue; 2015/2016. [cited 2017 June 05]. Available from: <http://pdf.directindustry.com/pdf/amf-andreas-maier/vacuum-clamping-technology/9232-632245.html>



- [22]. AMF. Zero-Point systems catalogue; 2017/2018. [cited 2017 June 05]. Available from: <http://pdf.directindustry.com/pdf/amf-andreas-maier/zero-point-systems/9232-572322.html>
- [23]. Batista R. Tendências do Corte por Arranque de Apara – Maquinagem. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2010.
- [24]. Mitsubishi Materials. MATERIAIS DAS FERRAMENTAS DE CORTE. [cited 2017 June 14]. Available from: [http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical\\_information/information/cutting\\_tool.html](http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/cutting_tool.html)
- [25]. Paiva TJCR. Preparação de trabalho e programação CAM para a maquinagem de componentes aeronáuticos. Instituto Superior Técnico; 2013.
- [26]. Davim JP. Princípios da Maquinagem. 2<sup>nd</sup> ed. Porto: Publindústria; 2008.
- [27]. Next Generation Tooling. BT, CAT & HSK: What's the important differences for my CNC?. [cited 2017 June 16]. Available from: <http://www.nextgentooling.com/technical/bt-cat-hsk-whats-the-important-differences-for-my-cnc>
- [28]. Completo A, Festas A, Davim JP. Tecnologia de fabrico. 1<sup>st</sup> ed. Porto: Publindústria; 2009.
- [29]. Sandvik. Fórmulas. [cited 2017 April 27]. Available from: [http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/formulas\\_and\\_definitions/formulas/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/formulas_and_definitions/formulas/pages/default.aspx)
- [30]. Handibot. [cited 2017 June 02]. Available from: <https://handibot.com/>
- [31]. Mazakusa. Intregex i400. [cited 2017 June 07]. Available from: <https://www.mazakusa.com/machines/integrex-i-400/>
- [32]. Sodick. ASX300L. [cited 2017 June 17]. Available from: <http://www.sodick.jp/product/tool/wedm/asx300l.html>
- [33]. ESPRIT. Rotary Wire EDM. [cited 2017 June 17]. Available from: <http://www.espritam.com/solutions/technology/rotary-wire-edm>
- [34]. YIHAWJET. Aerospace industry- CNC EDM H series. [cited 2017 June 17]. Available from: [http://www.yawjet.com/en/category/Aerospace-industry-CNC-EDM-H-Series/E01\\_cnc\\_h.html](http://www.yawjet.com/en/category/Aerospace-industry-CNC-EDM-H-Series/E01_cnc_h.html)
- [35]. Sandvik. CoroPlex SL. [cited 2017 May 21]. Available from: [http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coroplex\\_sl/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coroplex_sl/Pages/default.aspx)
- [36]. Exact Metrology. 3D Articulated Arm Scanning. [cited 2017 June 06]. Available from: <http://www.exactmetrology.com/3d-scanning-technology/articulated-arm>
- [37]. Tong T. 3D Scanners: Laser versus White Light. [cited 2017 June 06]. Available from: <http://lmi3d.com/company/digital-hub/blog/3d-scanners-laser-versus-white-light>
- [38]. Wenzel. When Will CT Become Mainstream?. [cited 2017 June 06]. Available from: <http://www.wenzel-cmm.co.uk/news/when-will-ct-become-mainstream/26>
- [39]. Hexagon. Hexagon Manufacturing Intelligence Introduces New Multisensor CMMs. [cited 2017 May 24]. Available from: <http://www.hexagonmi.com/pt-BR/about-us/news/media-releases/2016/september-2016/hexagon-manufacturing-intelligence-introduces-new-multisensor-cmms>
- [40]. Renishaw. PH20 5-axis touch-trigger system. [cited 2017 May 25]. Available from: <https://www.renishaw.com/en/ph20-5-axis-touch-trigger-system--12487>
- [41]. Renishaw. 5-axis technology. [cited 2017 May 25]. Available from: <https://www.renishaw.com/en/5-axis-technology--13413>
- [42]. Renishaw. Equator™ explained. [cited 2017 June 16]. Available from: <https://www.renishaw.com/en/equator-explained--13465>
- [43]. Keith Mills. Bench-Top CMM Offers Augmented Reality. [cited 2017 May 21]. Available from: <http://metrology.news/bench-top-cmm-offers-augmented-reality>
-

- [44]. Keyence - XM Series Handheld Probe Coordinate Measuring Machine Catalog; 2016. [cited 2017 May 22]. Available from: [https://www.keyence.com/landing/measure-sys/pr\\_xm\\_xtheta01.jsp](https://www.keyence.com/landing/measure-sys/pr_xm_xtheta01.jsp)
- [45]. Wikipedia. APT (programming language). [cited 2017 April 17]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/APT\\_\(programming\\_language\)](https://en.wikipedia.org/wiki/APT_(programming_language))
- [46]. Ross DT. Origins of the APT language for automatically programmed tools. ACM SIGPLAN Notices - Special issue: History of programming languages conference. 1978 August. vol. 13: p. 61-99
- [47]. American Machinist. The CAD/CAM Hall of Fame. [cited 2017 May 18]. Available from: <http://americanmachinist.com/cadcam-software/cadcam-hall-fame>
- [48]. Carlson W. A Critical History of Computer Graphics and Animation. [cited 2017 May 20]. Available from: <http://excelsior.biosci.ohio-state.edu/~carlson/history/lesson3.html>
- [49]. Wikipedia. Computer-aided design. [cited 2017 May 18]. Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided\\_design](https://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design)
- [50]. Solid Modeling Association. Bézier Award. [cited 2017 June 23]. Available from: <http://solidmodeling.org/awards/bezier-award/>
- [51]. Kamermans M. A Primer on Bézier Curves. [cited 2017 June 23]. Available from: <https://pomax.github.io/bezierinfo/>
- [52]. Ramos A. História da computação gráfica: Sketchpad, A Man-Machine Graphical Communication System. [cited 2017 June 14]. Available from: <https://computacaograficaecinema.wordpress.com/2013/07/05/historia-da-computacao-grafica-sketchpad-a-man-machine-graphical-communication-system-2/>
- [53]. Wikipedia. Computer-aided design/History, Present and Future. [cited 2017 May 16]. Available from: [https://en.wikiversity.org/wiki/Computer-aided\\_design/History,\\_Present\\_and\\_Future#Future](https://en.wikiversity.org/wiki/Computer-aided_design/History,_Present_and_Future#Future)
- [54]. 12CAD. The Future of CAD/CAM. [cited 2017 May 16]. Available from: <http://www.computeraideddesignguide.com/the-future-of-cad-cam/>
- [55]. Chevalier A, Bohan J. Guide du technicien en productique. 1<sup>st</sup> ed. Paris: Hachette technique; 1979
- [56]. Relvas C. Controlo Numérico Computorizado: Conceitos Fundamentais. 2<sup>nd</sup> ed. Porto: Publindústria; 2002
- [57]. Freitas VT. Organização de uma pequena unidade fabril. Tese de Mestrado. Universidade do Minho; 2014
- [58]. Marinho MB. Sistema de Gestão de Ferramentas Simoldes Aços. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto; 2011



# Anexos

## I. Etapas para medição numa CMM com uso do PC-DMIS e algumas considerações

Este anexo tem como objetivo facilitar a compreensão dos processos medição por CMM, sistematizando os passos principais e mais comuns utilizados nesta área da metrologia e controlo dimensional.

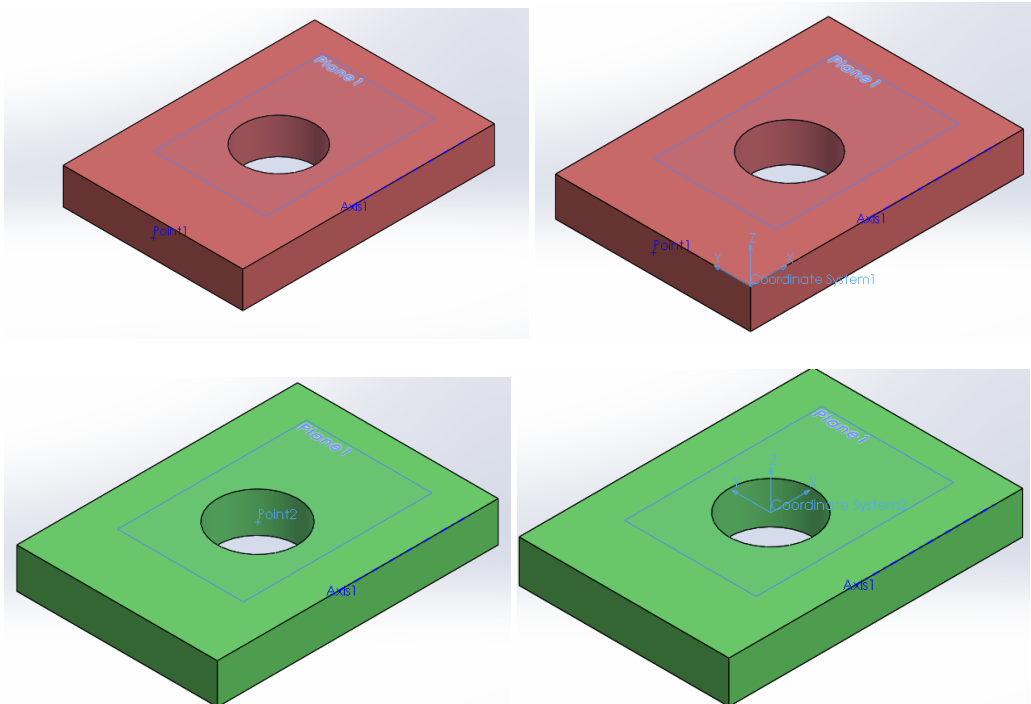
Também fala de alguns cuidados e problemas comuns e como os resolver.

### Etapas para a medição de uma peça numa CMM:

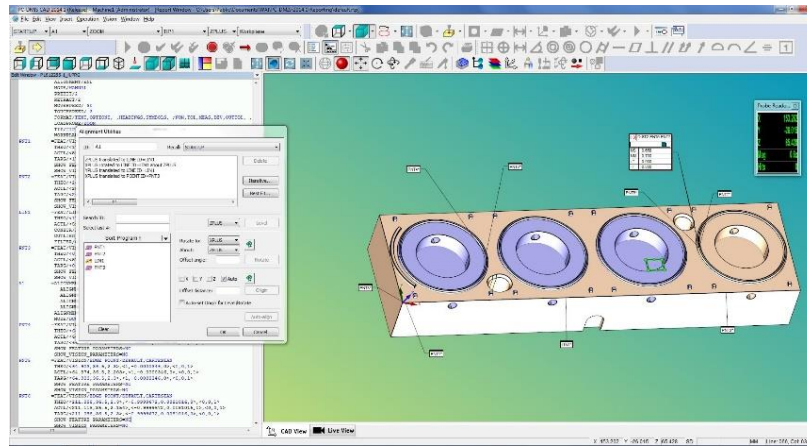
1. Fixar a peça no espaço de trabalho da máquina (para facilitar tentar alinhar com os eixos)
2. Abrir o *Software* e importar o modelo CAD (STEP, IGS , ect)
3. Referenciar **Manualmente** a Peça
  - a. Plano (4pontos) - plano de trabalho
    - i. Vai corresponder (geralmente) ao plano XoY.
  - b. Linha – pode ser obtida através de 2 Pontos ou 2 círculos (onde se conta desde o ponto central)
    - i. Orientação eixo X
    - ii. Origem em Y
  - c. Ponto – pode ser obtido por 1 ponto ou pelo centro de um círculo.
    - i. origem em X
    - ii. Quando consideramos um Circulo
      - a. Mínimo 3 pontos para referenciar um circulo - Quantos mais pontos usar, melhores resultados são obtidos;
      - b. Geralmente o ponto central do circulo vai ser usado como a origem do nosso referencial em X e Y

a)  
Ou

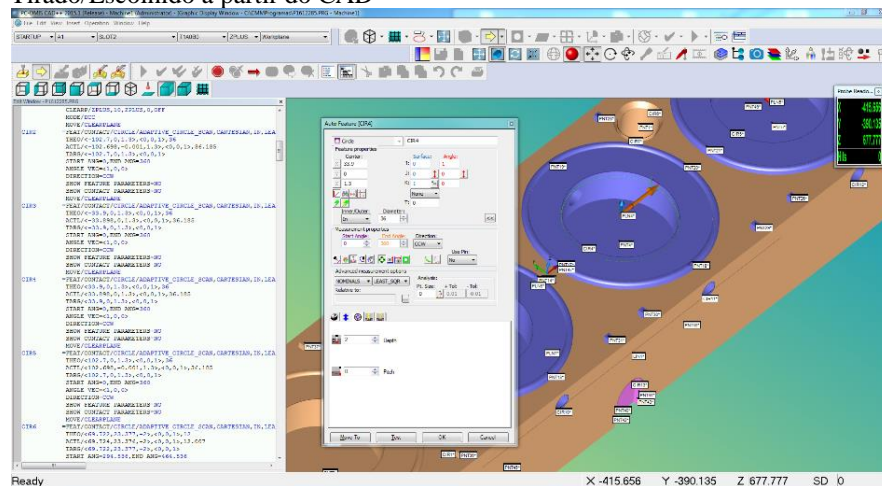
b)



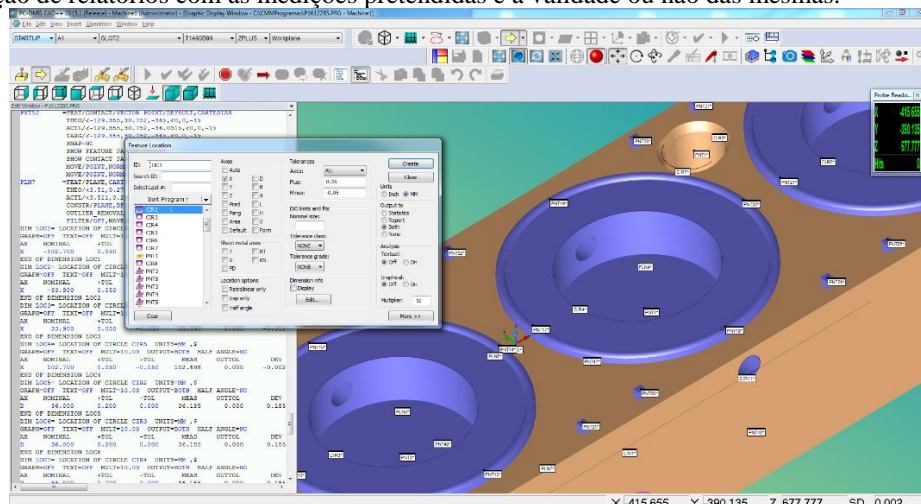
4. Alinhar o Referencial do CAD com o referencial Medido (Operation->Graphic Display Window->Transform) (alignment)



5. Passar a Máquina para modo automático (DCC) (semelhante ao CNC)
6. Criar um plano de Segurança (F10->Clearance Plane)
  - Se necessário, tirar em modo automático novos pontos, e voltar a fazer um novo alinhamento que irá ser mais preciso e com menor erro;
7. Em automático selecionar quais os pontos e geometrias a tirar
  - a. Autofeature
  - b. Tirado/Escolhido a partir do CAD



8. Com as geometrias tiradas e sabendo as coordenadas e características delas, proceder à medição real das cotas e sua comparação com o modelo CAD e com as tolerâncias do desenho 2D;
9. Elaboração de relatórios com as medições pretendidas e a validade ou não das mesmas.



#### **Caso da CMM com punho de orientação variável (5 eixos)**

1. Repetir os passos ditos antes para medições no plano atual do punho
2. Caso seja necessária a rotação do punho para medir algumas geometrias inacessíveis ao longo do plano anterior:
  - a. Mover a cabeça para uma posição de segurança na qual possa mudar a orientação do punho sem colisões
  - b. Definir um novo plano de segurança ao longo da orientação do punho
    - i. Ou então enviar um novo ponto no espaço 3D que sirva como segurança

#### **Considerações sobre as CMM**

##### **Principais causas de não conformidades**

1. Deficiência ao tirar os pontos para alinhamento – pode gerar erros de centésimas de milímetro que podem diferenciar entre a conformidade ao não de uma peça
  - a. O operador CNC normalmente posiciona a peça ao centro o eu pode levar a algumas diferenças se a referência na medição por CMM não for a mesma
  - b. Insuficiência de pontos representativos dos elementos
2. Fixação da Peça – não ser bem efetuada
3. Erros de maquinação – Peça mal maquinada
4. Erro do operador ao tirar elementos
5. Calibração da máquina

##### **Problemas nas medições**

- Importação em Step é muito versátil
  - Mas pode gerar erros na importação de superfícies do CAD
    - Podem não aparecer (caso das roscas)
    - Podem ter erros de algumas milésimas
- Ao fazer medições de precisão elevada
  - É melhor fazer o alinhamento da peça ao centro e depois dar a translação dos valores teórica uma vez que as peças no CNC são todas orientadas a partir do centro da peça
    - Podemos criar linhas em pontos opostos e fazer 2 midlines e a sua intersecção ser o centro/zero peça
    - As peças são orientadas ao centro nas CNC, uma vez que o material vem com sobre espessura e alinhando ao meio eles podem maquinar todo o material.
- Diferença a medir pequenos furos
  - Medir pequenas geometrias com ponteiros de diâmetro mais pequeno é sempre mais aconselhável e os resultados são mais fiéis à realidade, além de evitar possíveis colisões.

##### **Cuidados especiais**

- Caso se mude a orientação do punho e não se atualize o plano de segurança é necessário desativá-lo ou apagar do código, uma vez que pode levar a movimentos que levarão a colisões
- Cuidado ao copiar ou mover pontos uma vez que os planos de segurança não serão copiados

##### **Ponteira de Scan vs Ponteira de Apalpação**

- Scan permite fazer o varrimento 3D e criação de uma nuvem de pontos
- Scan permite outras funções como o “Adaptative Circle Scan”, que mede um círculo por varrimento e com mais pontos torna a medição mais exata
- Apalpação é mais sensível
- Apalpação apenas sente o toque e não a direção da sua deslocação

##### **Calibração de uma Máquina de Medição de Coordenadas**

- Esfera Padrão em todas as orientações do punho e vários pontos
- Círculo Padrão
  - Mais eficaz para calibração da visão
  - Eficaz também para calibração em x e y
- Outros artefactos (como são chamados) de elevada precisão que possam ser medidos, e segundo essa medição a máquina calibre as ponteiros (autocalibrate)



### Resolução das Maquinas CMM

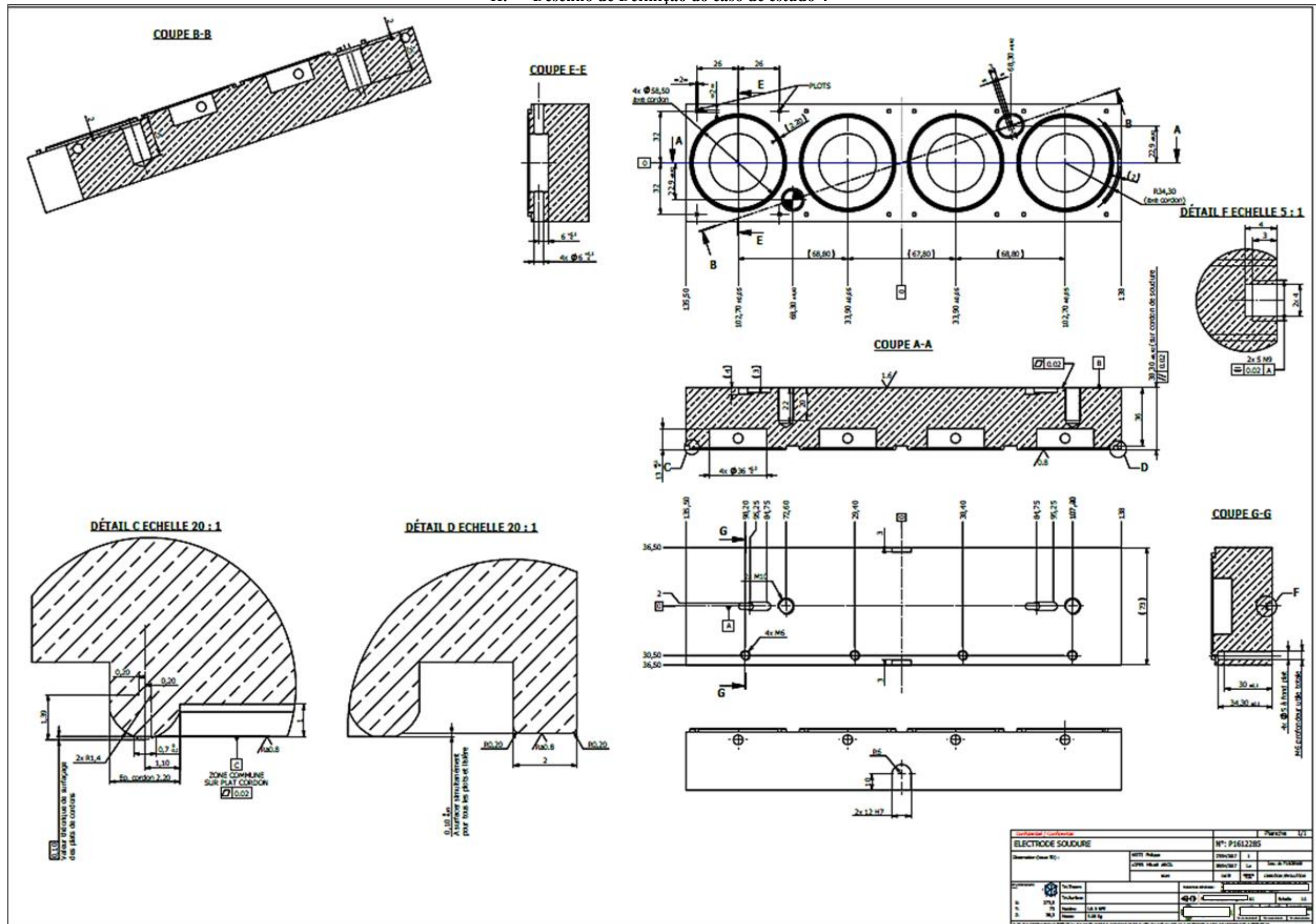
1. Encoders
  - Réguas Óticas com 0.00001 mm
2. Motores
  - Lineares com passo 0.0001 mm

### Medição de peças com geometrias “livres” – exemplo Pé Humano

- Controlo das dimensões
  - Através de varrimento/Scan
  - Tirar vários pontos e fazer a diferença/desvio do ponto relativo ao CAD 3D
    - Esta diferença é a maior distância possível no espaço  $\sqrt[3]{x^2 + y^2 + z^2}$



## II. Desenho de Definição do caso de estudo 4

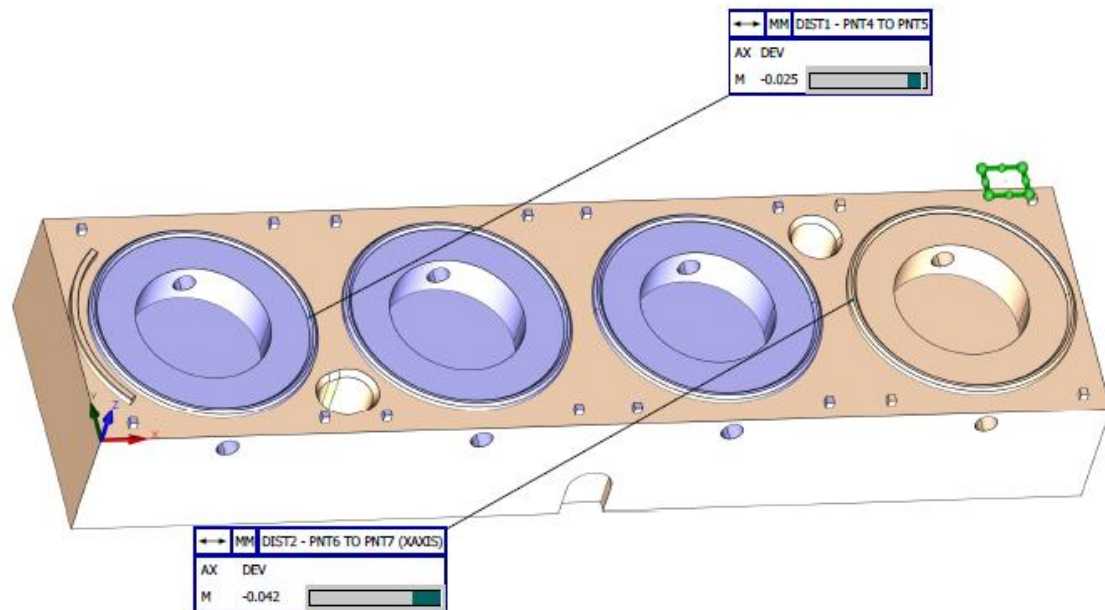


### III. Relatórios Gerados - Caso de estudo 3

#### Primeira Medição

Production Part Approval Process Dimensional Results						
Supplier: <Supplier>			Part Number: <Part Number>			
Inspection Facility: <Inspection Facility>			Part Name: P1812285			
Sample Identification: <Identification>			Revision:			
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	-102.700 (LOC1-X)	0.050	-0.050	-102.698	✓	
2	-33.900 (LOC2-X)	0.050	-0.050	-33.898	✓	
3	33.900 (LOC3-X)	0.050	-0.050	33.898	✓	
4	102.700 (LOC4-X)	0.050	-0.050	102.698	✓	
5	36.000 (LOC5-D)	0.200	0.000	36.185	✓	
6	36.000 (LOC6-D)	0.200	0.000	36.185	✓	
7	36.000 (LOC7-D)	0.200	0.000	36.185	✓	
8	36.000 (LOC8-D)	0.200	0.000	36.185	✓	
9	-22.900 (LOC9-Y)	0.020	-0.020	-22.899	✓	
10	68.300 (LOC10-X)	0.050	-0.050	68.302	✓	
11	22.900 (LOC10-Y)	0.020	-0.020	22.899	✓	
12	13.000 (DIST1-M)	0.100	0.000	13.073	✓	
13	0.000 (FLAT2-M)	0.020	0.000	0.003	✓	
14	6.000 (LOC11-D)	0.100	0.000	6.029	✓	
15	6.000 (LOC12-D)	0.100	0.000	6.024	✓	
16	6.000 (LOC13-D)	0.100	0.000	6.016	✓	
17	6.000 (LOC14-D)	0.100	0.000	6.014	✓	
18	6.000 (DIST2-M)	0.100	0.000	6.030	✓	
19	6.000 (DIST3-M)	0.100	0.000	6.030	✓	
20	6.000 (DIST4-M)	0.100	0.000	6.042	✓	
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
21	6.000 (DIST5-M)	0.100	0.000	6.040	✓	
22	38.300 (DIST6-M)	0.200	-0.200	38.324	✓	

### Terceira Medição



Production Part Approval Process Dimensional Results						
Supplier: <Supplier>			Part Number: <Part Number>			
Inspection Facility: <Inspection Facility>			Part Name: P1612285-1_1			
Sample Identification: <Identification>			Revision:			
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	0.700 (DIST1-M)	0.010	-0.200	0.675	✓	
2	0.700 (DIST2-M)	0.000	-0.200	0.658	✓	

#### IV. Ficha Sequencial Tipo máquina - Caso estudo 3

Relatório tipo gerado por *software* de CAD/CAM, que representa os parâmetros gerais de cada operação programada.

Lista de Operações											Data: 20/05/17	
Nome: P1612285			Material: Bronze UA 9 NFE				Máquina: Fresadora CNC (Doosan DNM 650)		Responsável: Cláudio Neves			
Nº Operação Nome Operação		FASE 10										
		Tipo de operação	Ferramenta	Diâmetro ferramenta (mm)	Raio Cant	Nº da ferramenta	Sobre-espessura em XY (mm)	Sobre-espessura em Z (mm)	Incremento em Z (mm)	Velocidade de Rotação (rpm)	Velocidade de Corte (mm/min)	Tipo Refrigeração
1	Facejamento (desbaste)	ZIG-ZAG	Fresa de pastilhas	50	0	30	0	0.1	1	1000	1000	Ar
2	Fresagem lateral (desbaste)	Contorno Z	Fresa de pastilhas	25	0	29	0.5	0.5	0.5	2000	3000	Ar
3	Fresagem topo e lateral (desbaste)	Desbaste	Fresa 2 gumes	12	0	26	0.2	0.2	0.5	5000	1500	Água + Lubrificante
4	Fresagem topo e lateral (desbaste)	Desbaste adaptável	Fresa 2 gumes	4	0	17	0.2	0.2	3	10000	2600	Água + Lubrificante
5	Fresagem lateral (Pré Acabamento)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	12	0	26	0	0	10	4000	2000	Água + Lubrificante
6	Fresagem lateral (Acabamento)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	11.93	0	27	0	0	5	6000	2000	Água + Lubrificante
7	Fresagem lateral (Acabamento)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	11.93	0	27	0	0	5	6000	2000	Água + Lubrificante
8	Facejamento	ZIG-ZAG	Fresa 2 gumes	20	0	23	0	0	2	5000	1500	Água + Lubrificante
Nº Operação	Nome Operação	FASE 20										
1	Ponteamento	Ciclo Pontear	QBA 45°	6	0	5	0	0	2	5000	70	Água + Lubrificante
2	Furação	Ciclo Furação	Broca Helicoidal	5	0	9	0	0	3	1000	70	Água + Lubrificante
3	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	Ciclo maquinação c/ mandril	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	1	4000	300	Água + Lubrificante
4	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	Ciclo maquinação c/ mandril	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	1	4000	300	Água + Lubrificante

5	Fresagem lateral do furo (corte contra)	Ciclo maquinação c/ mandril	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	1	4000	250	Água + Lubrificante
6	Fresagem topo e lateral (desbaste)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0.1	0	0.5	3500	1000	Água + Lubrificante
7	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte a favor)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	9.994	0	25	0	0	1	2000	500	Água + Lubrificante
8	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte contra)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	9.994	0	25	0	0	1	2000	400	Água + Lubrificante
9	Quebrar Arestas	Contorno Z	QBA 45°	6	0	5	0	0	2	6000	800	Água + Lubrificante
Nº Operação	Nome Operação	FASE 30										
1	Ponteamento	Ciclo Pontear	QBA 45°	6	0	5	0	0	2	5000	70	Água + Lubrificante
2	Furação	Ciclo Furação	Broca Helicoidal	5	0	9	0	0	3	1000	70	Água + Lubrificante
3	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	Ciclo maquinação c/ mandril	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	1	4000	300	Água + Lubrificante
4	Fresagem lateral do furo (corte a favor)	Ciclo maquinação c/ mandril	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	1	4000	300	Água + Lubrificante
5	Fresagem lateral do furo (corte contra)	Ciclo maquinação c/ mandril	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	1	4000	250	Água + Lubrificante
6	Fresagem topo e lateral (desbaste)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0.1	0	0.5	3500	1000	Água + Lubrificante
7	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte a favor)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	9.994	0	25	0	0	1	2000	500	Água + Lubrificante
8	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte contra)	Contorno Z	Fresa 2 gumes	9.994	0	25	0	0	1	2000	400	Água + Lubrificante
9	Quebrar Arestas	Contorno Z	QBA 45°	6	0	5	0	0	2	6000	800	Água + Lubrificante
Nº Operação	Nome Operação	FASE 40										
1	Ponteamento	Ciclo Pontear	QBA 45°	6	0	5	0	0	2	5000	100	Água + Lubrificante
2	Furação	Ciclo Furação	Broca Helicoidal	5	0	9	0	0	2	3000	250	Água + Lubrificante
3	Mandrilagem	Ciclo Pontear	Mandril	5	0	10	0	0	0	1500	70	Água + Lubrificante

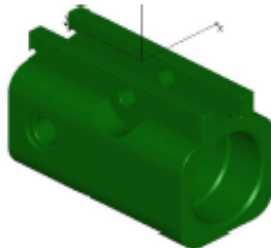
4	Furação	Ciclo Furação	Broca Helicoidal	8.5	0	11	0	0	2	1000	100	Água + Lubrificante
5	Fresagem topo e lateral (desbaste)	Contorno Z	Fresa de 2 gumes	3	0	0	0.1	0.1	0.5	6000	1000	Água + Lubrificante
6	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte a favor)	Contorno Z	Fresa de 2 gumes	3.005	0	1	0	0	0.5	5000	700	Água + Lubrificante
7	Fresagem topo e lateral (Acabamento) (corte contra)	Contorno Z	Fresa de 2 gumes	3.005	0	1	0	0	0.5	5000	650	Água + Lubrificante
8	Quebrar Arestas	Contorno Z	QBA 45°	6 (3)	0	5	0	0	2	10000	3000	Desligado
9	Quebrar Arestas	Contorno Z	QBA 45°	6 (3.5)	0	5	0	0	2	10000	3000	Desligado
10	Escarear	Ciclo maquinação c/ mandril	QBA 45°	6 (5)	0	5	0	0	2.5	8000	800	Desligado
11	Escarear	Ciclo maquinação c/ mandril	QBA 45°	6 (5)	0	5	0	0	2.5	8000	800	Desligado
Nº Operação	Nome Operação	FASE 50										
1	Faceamento	Areal Horizontal Machos	Fresa de 2 gumes	8	0	21	0.1	0.1	0	8000	1500	Água + Lubrificante
2	Fresagem topo e lateral em desbaste	Areal Horizontal	Fresa de 2 gumes	8	0	21	0.1	0.1	0	5000	1000	Água + Lubrificante
3	Fresagem topo e lateral em desbaste	Desbaste adaptável	Fresa de 2 gumes	4	0	17	0.1	0.1	2.2	10000	3000	Água + Lubrificante
4	Fresagem topo e lateral em desbaste	Contorno Z	Fresa de 2 gumes	2	0	15	0.1	0.1	0.1	11000	1000	Água + Lubrificante
5	Ponteameto	Ciclo Pontear	QBA 45°	6	0	5	0	0	2	5000	70	Água + Lubrificante
6	Furação	Ciclo Furação	Broca Helicoidal	10.5	0	11	0	0	3	600	80	Água + Lubrificante
7	Furação	Ciclo Furação	Broca Helicoidal	10.5	0	11	0	0	3	600	80	Água + Lubrificante
8	Fresagem topo e lateral em desbaste	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	21	0.1	0.1	1	3000	400	Água + Lubrificante
9	Fresagem topo e lateral em desbaste	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	21	0.1	0.1	0.5	4000	6000	Água + Lubrificante
10	Escarear	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	1	23	0	0	0.1	8000	1000	Água + Lubrificante
11	Fresagem topo em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0	0	0	10000	500	Água + Lubrificante



12	Fresagem topo em acabamento	Área Horizontal Machos	Fresa 2 gumes	8.1	0	22	0	0.02	0	10000	500	Água + Lubrificante
13	Fresagem topo e lateral em acabamento	Área Horizontal Machos	Fresa 2 gumes	7.95	0	22	0	0	0	6000	800	Água + Lubrificante
14	Fresagem lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	7.82	0	22	0	0	0	4000	800	Água + Lubrificante
15	Fresagem lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	7.82	0	22	0	0	0	4000	800	Água + Lubrificante
16	Fresagem topo em acabamento	Transformed Área Horizontal	Fresa 2 gumes	7.95	0	22	0	0	0	6000	800	Água + Lubrificante
17	Fresagem topo e lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0	0	0	3000	300	Água + Lubrificante
18	Fresagem topo e lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0	0	0	3000	300	Água + Lubrificante
19	Fresagem topo e lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0	0	0	3000	300	Água + Lubrificante
20	Fresagem topo e lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	8	0	22	0	0	0	3000	300	Água + Lubrificante
21	Fresagem lateral em desbaste	Contorno Z	Fresa 2 gumes	3.97	0	18	0.1	0	3	8000	1000	Água + Lubrificante
22	Fresagem lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	3.97	0	18	0	0	3	8000	700	Água + Lubrificante
23	Fresagem topo e lateral em acabamento	Área Horizontal Machos	Fresa 2 gumes	4	0	18	0	0	0	8000	1000	Água + Lubrificante
24	Fresagem topo e lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	1.97	0.2	16	0	0	0.3	8000	800	Água + Lubrificante
25	Fresagem topo e lateral em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	1.97	0.2	16	0	0	0.3	8000	800	Água + Lubrificante
26	Fresagem em contorno de forma em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	2	0.2 (0.3)	16	0	0	0.03	11000	2500	Água + Lubrificante
27	Fresagem em contorno de forma em acabamento	Contorno Z	Fresa 2 gumes	2	0.2 (0.3)	16	0	0	0.1	11000	2500	Água + Lubrificante
28	Quebrar Arestas	Contorno Z	Fresa 2 gumes	2	0.2 (0.3)	16	0	0	0.03	11000	2000	Água + Lubrificante
29	Quebrar Arestas	Contorno Z	Fresa 2 gumes	2	0.2 (0.3)	16	0	0	0.05	11000	2000	Água + Lubrificante
30	Quebrar Arestas	Contorno Z	QBA 45°	6 (4.5)	0	5	0	0	1	8000	1000	Água + Lubrificante
31	Quebrar Arestas	Contorno Z	QBA 45°	6 (4.2)	0	5	0	0	1	8000	1000	Água + Lubrificante

## V. Caso de Estudo 4 – Relatório Sequencial

Relatório gerado por *software* de CAD/CAM, que representa os parâmetros gerais de cada operação programada.


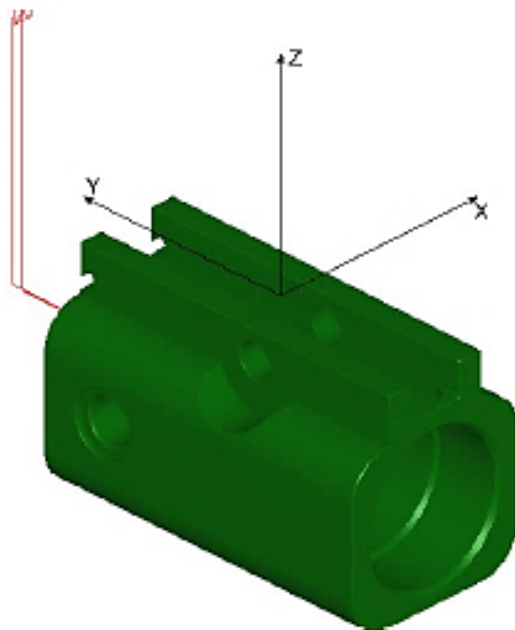
<b>DEPO CAM</b>	<b>Data</b>		segunda-feira, 5 de junho de 2017			
<b>Nome Base Dados</b>	\\192.168.1.5\MTEC_Misc\c\AUDIO\carter\ CARTER_05-06-2.17.dca					
<b>Prefixo Projecto</b>	005.14.001.001_CARTER					
<b>Responsável Projecto</b>						
<b>Directoria Projecto</b>	\\192.168.1.5\MTEC_Producao\SUNV\AUTO\SUN_005\15-03-2016\					
<b>Comentário Projecto</b>						
	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>
<b>Tamanho Peça</b>	X -71.5	71.5	Y -56	56	Z -71	4
<b>Limites Movimento</b>	X -48.239	47.924	Y -91.442	94.129	Z -54.5	103

Op No.	Nome	Estratégia	Nº Ferramenta	Diâmetro	Raio Canto	Sob-Espessura	Ficheiro	Tempo Previsto
<a href="#">1</a>	Programa ao longo do Limite 7 [63x0, 0.1]	Programa ao longo do Limite	22	63	0	0.1	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:02
<a href="#">2</a>	Programa Contorno Z 252 [12x0, 0.2]	Programa Contorno Z	25	12	0	0.2	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:13
<a href="#">3</a>	Programa Contorno Z 234 [12x0, 0.15]	Programa Contorno Z	25	12	0	0.15	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:10
<a href="#">4</a>	Programa Contorno Z 184 [12x0, 0.15]	Programa Contorno Z	25	12	0	0.15	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:01
<a href="#">5</a>	Programa Contorno Z 246 [12.3x0, 0]	Programa Contorno Z	24	12.3	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:16
<a href="#">6</a>	Ciclo de Furação em Profundidade Toolpath 40 [27.2, 93 prof]	Ciclo de Furação em Profundidade Toolpath	23	27.2	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:18
<a href="#">7</a>	Programa Contorno Z 262 [12x0, 0.15, 0]	Programa Contorno Z	25	12	0	0.15 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:10
<a href="#">8</a>	Programa Contorno Z 265 [12x0, 0.15, 0]	Programa Contorno Z	25	12	0	0.15 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:05
<a href="#">9</a>	Programa Contorno Z 254 [11.965x0, 0]	Programa Contorno Z	6	11.965	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:13
<a href="#">10</a>	Programa Contorno Z 189 [12x0, 0]	Programa Contorno Z	6	12	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:04
<a href="#">11</a>	Programa Contorno Z 137 [12.1x0.1, 0]	Programa Contorno Z	6	12.1	0.1	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:12
<a href="#">12</a>	Programa Contorno Z 138 [12.1x0.1, 0]	Programa Contorno Z	6	12.1	0.1	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:14
<a href="#">13</a>		Programa Contorno Z	6	12.05	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:08

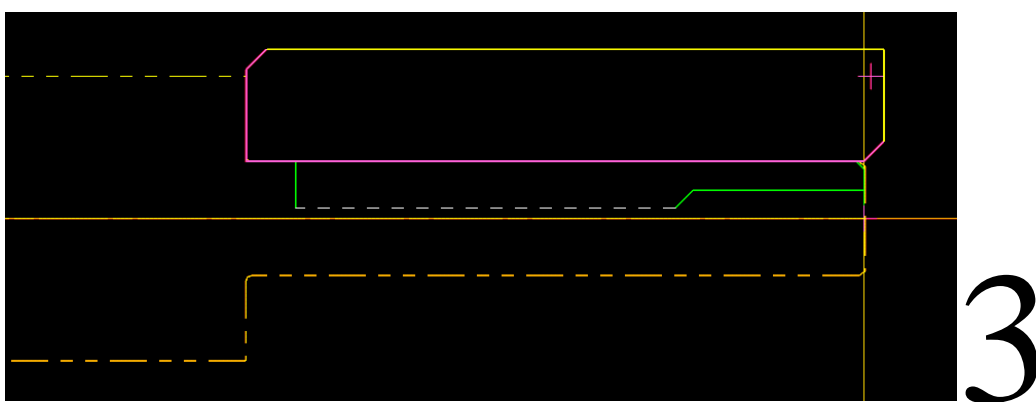
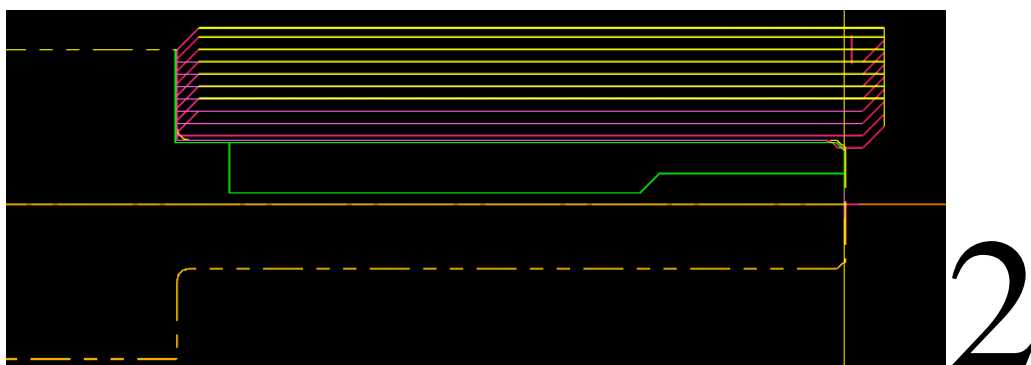
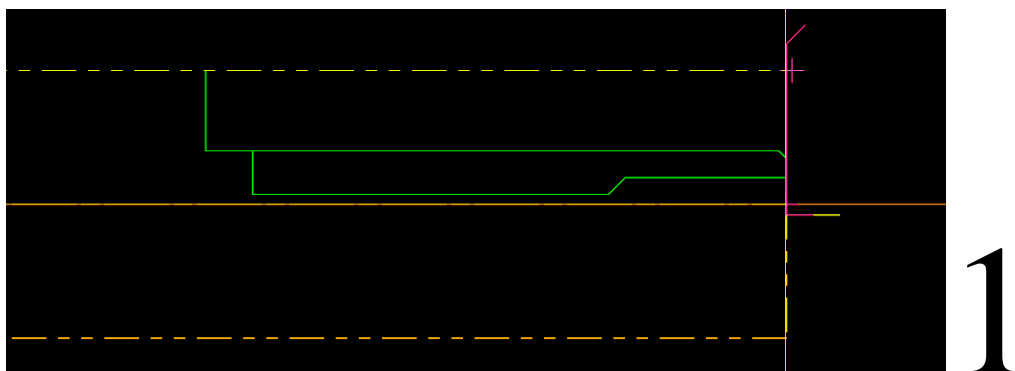
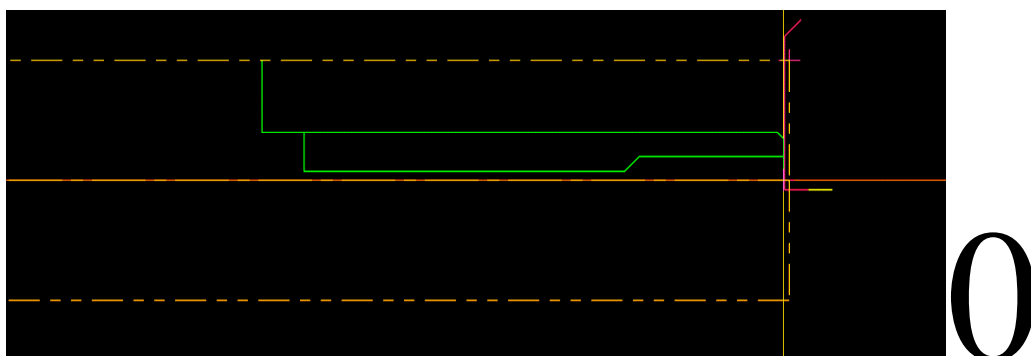
	Programa Contorno Z 201 [12.05x0, 0]							
<a href="#">14</a>	Programa Contorno Z 202 [12.05x0, 0]	Programa Contorno Z	6	12.05	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:08
<a href="#">15</a>	Programa Contorno Z 91 [50x0, 0]	Programa Contorno Z	12	50	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:07
<a href="#">16</a>	Ciclo de rosca com buri- Interna/ Direita Toolpath 28 [7.5, 1.5 prof]	Ciclo de rosca com buri- Interna/ Direita Toolpath	14	7.5	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:09
<a href="#">17</a>	Ciclo de rosca com buri- Interna/ Direita Toolpath 28 [7.5, 1.5 prof]	Ciclo de rosca com buri- Interna/ Direita Toolpath	14	7.5	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:09
<a href="#">18</a>	Programa Contorno Z 141 [8x0, 0.2, 0]	Programa Contorno Z	4	8	0	0.2 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:06
<a href="#">19</a>	Programa Contorno Z 166 [8x0, 0.2, 0]	Programa Contorno Z	4	8	0	0.2 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:05
<a href="#">20</a>	Programa Contorno Z 167 [8x0, 0.2, 0]	Programa Contorno Z	4	8	0	0.2 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:02
<a href="#">21</a>	Transformed Programa Contorno Z 16 [8x0, 0.2, 0]	Programa Contorno Z	4	8	0	0.2 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:02
<a href="#">22</a>	Rest Programa Contorno Z 150 [4x0, 0.2]	Programa Contorno Z	2	4	0	0.2	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:08
<a href="#">23</a>	Programa Contorno Z 151 [4x0.2, 0]	Programa Contorno Z	2	4	0.2	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:07
<a href="#">24</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 17 [6,2 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	5	6	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:05
<a href="#">25</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 18 [6,2 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	5	6	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03
<a href="#">26</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 10 [2,1 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	5	2	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:02
<a href="#">27</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 2 [7.8,28 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	8	7.8	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:09
<a href="#">28</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 26 [10.2,16 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	9	10.2	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03
<a href="#">29</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 27 [10.2,16 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	9	10.2	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03
<a href="#">30</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 11 [2,10 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	7	2	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:07
<a href="#">31</a>		Ciclo de rosca- Direita Toolpath	11	12	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03

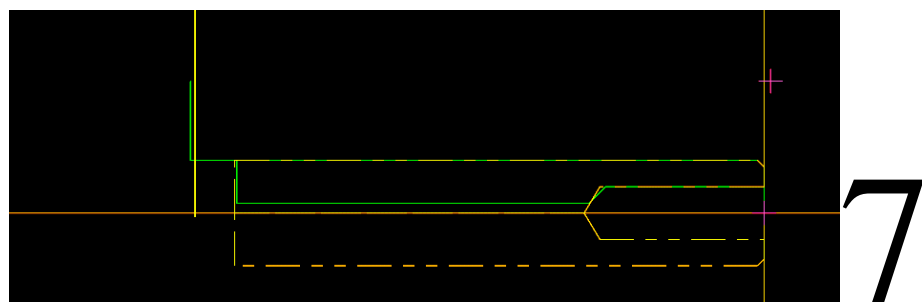
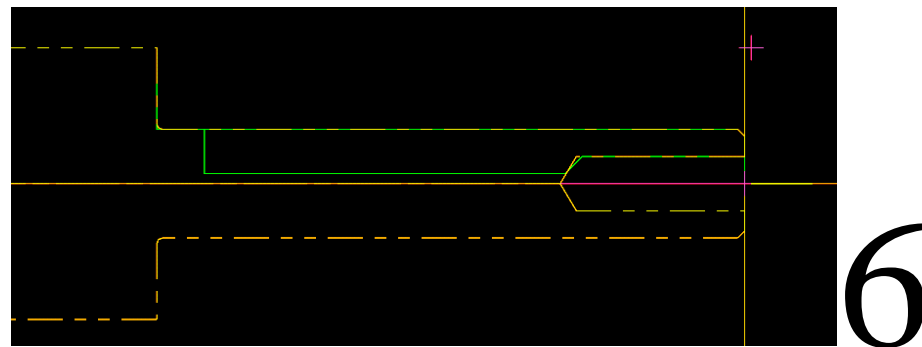
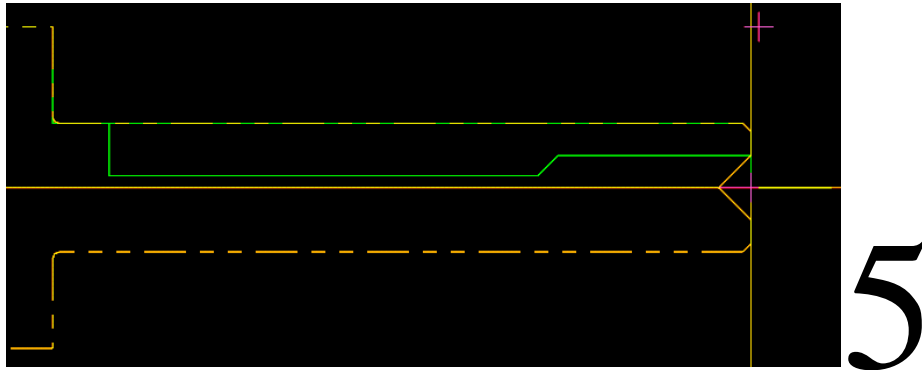
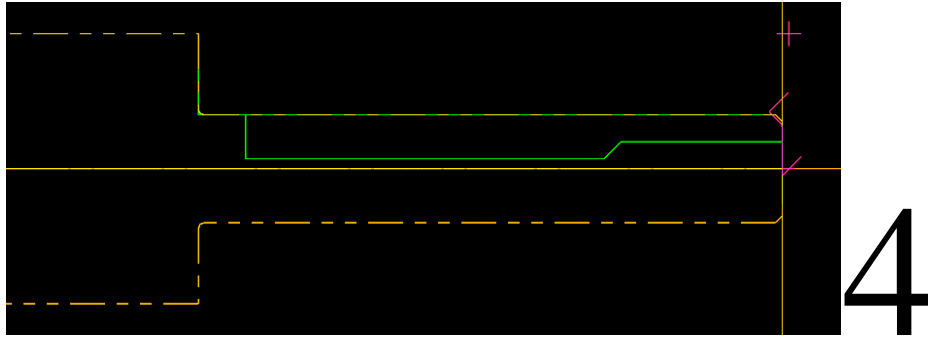
	Ciclo de rosca-Direita Toolpath 38 [12,21 prof]							
<a href="#">32</a>	Ciclo de rosca-Direita Toolpath 39 [12,21 prof]	Ciclo de rosca-Direita Toolpath	11	12	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03
<a href="#">33</a>	Programa Contorno Z 152 [8x0, 0,2, 0]	Programa Contorno Z	4	8	0	0,2 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:02
<a href="#">34</a>	Transformed Programa Contorno Z 14 [8x0, 0,2, 0]	Programa Contorno Z	4	8	0	0,2 ; 0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:02
<a href="#">35</a>	Ciclo para Pontear Toolpath 37 [8,28 prof]	Ciclo para Pontear Toolpath	10	8	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:42
<a href="#">36</a>	Programa Contorno Z 200 [11.98x0,5, 0]	Programa Contorno Z	6	11.98	0,5	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:53
<a href="#">37</a>	Programa Contorno Z 200 [11.98x0,5, 0]	Programa Contorno Z	6	11.98	0,5	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:50
<a href="#">38</a>	Programa Contorno Z 178 [11.99x0, 0]	Programa Contorno Z	6	11.99	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:06
<a href="#">39</a>	Programa Contorno Z 254 [11.965x0, 0]	Programa Contorno Z	6	11.965	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:13
<a href="#">40</a>	Programa Contorno Z 154 [12x0, 0]	Programa Contorno Z	6	12	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:05
<a href="#">41</a>	Programa Contorno Z 155 [9,95x1, 0]	Programa Contorno Z	13	9.95	1	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:15
<a href="#">42</a>	Programa Contorno Z 156 [9,95x0, 0]	Programa Contorno Z	13	9.95	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:06
<a href="#">43</a>	Programa Contorno Z 157 [9,95x0, 0]	Programa Contorno Z	13	9.95	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:06
<a href="#">44</a>	Programa Contorno Z 158 [9,95x0, 0]	Programa Contorno Z	13	9.95	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:06
<a href="#">45</a>	Programa Contorno Z 255 [9,96x0, 0]	Programa Contorno Z	13	9.96	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:10
<a href="#">46</a>	Transformed Programa Contorno Z 15 [9,95x0, 0]	Programa Contorno Z	13	9.95	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:06
<a href="#">47</a>	Programa Contorno Z 106 [3,95x0, 0]	Programa Contorno Z	2	3.95	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:01
<a href="#">48</a>	Programa Contorno Z 107 [3,95x0, 0]	Programa Contorno Z	2	3.95	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:07
<a href="#">49</a>	Programa Contorno Z 100 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:14
<a href="#">50</a>	Programa Contorno Z 92 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:12
<a href="#">51</a>	Programa Contorno Z 95 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03
<a href="#">52</a>	Transformed Programa Contorno Z 9 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:03
<a href="#">53</a>	Programa Contorno Z 97 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:01
<a href="#">54</a>	Transformed Programa Contorno Z 10 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:01
<a href="#">55</a>	Programa Contorno Z 261 [0,1x0, 0]	Programa Contorno Z	5	0,1	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:16
<a href="#">56</a>	Programa Contorno Z 221 [11.97x0, 0]	Programa Contorno Z	6	11.97	0	0	<a href="#">CARTER_05-06-17.mpf</a>	00:00:08
<b>Tempo Total</b>								<b>00:08:35</b>

## VI. Características das operações do caso de estudo 4

		<b>DEPO CAM</b>		<b>NCG CAM</b> v13.0.09		<b>Programa Contorno</b> <b>Z 265 [12x0, 0.15,0]</b>		segunda-feira, 5 de junho de 2017	
<b>Diâmetro</b>		<b>Raio Canto</b>							
<b>12</b>		<b>0</b>							
Nome Ferramenta		Acabamento [12x0 24, 0.15,0]							
Nome Fresa		Acabamento [12x0 24, 0.15,0]							
Cone		Não defenido							
Tipo Ferramenta		Acabamento							
Nº Ferramenta		25							
Estratégia		Programa Contorno Z							
Altura do Corpo		24							
Angulo lâmina		0							
Sob-Espessura		0.15 ; 0							
Tolerância		0.001							
Z Segurança		73							
Incremento Lateral		0							
Incremento Z		35							
Rotação		18000							
Refrigeração		Ligado							
Rápido		60000							
Rampa Entrada		5000							
Corte		5000							
Rampa Saída		5000							
Perfil do eixo									
Altura necessária		Não defenido							
Defenição de cone necessária		Não defenido							
Nome de cone necessário		Não defenido							
<b>Plano trabalho</b>		A:-90 B:0 C:0		Offset trabalho		54			
<b>Movimento</b>		<b>Min</b>	<b>Max</b>	Ficheiro		<a href="#">\\192.168.1.5\IMTEC_Misc\c\AUDIO\carter\CARTER_05-06-17.mpf</a>			
<b>X</b>		-3.6	3.622	Directoria Projecto		<a href="#">\\192.168.1.5\IMTEC_Producao\SUNVIAUTO\SUN_005\15-03-2016\</a>			
<b>Y</b>		-31	33.6	Comentário Projecto					
<b>Z</b>		8	73	Comentário Programa		0.1			

**VII. Etapas de maquinação (vista *Software*) – Caso de estudo 5**





**Legenda:**

Laranja – Bruto/Peça maquinada até ao momento;

Verde – Silhueta da peça final, obtida através do modelo CAD3D;

Roxo – Movimentos de corte;

Amarelo – Movimentos rápidos.

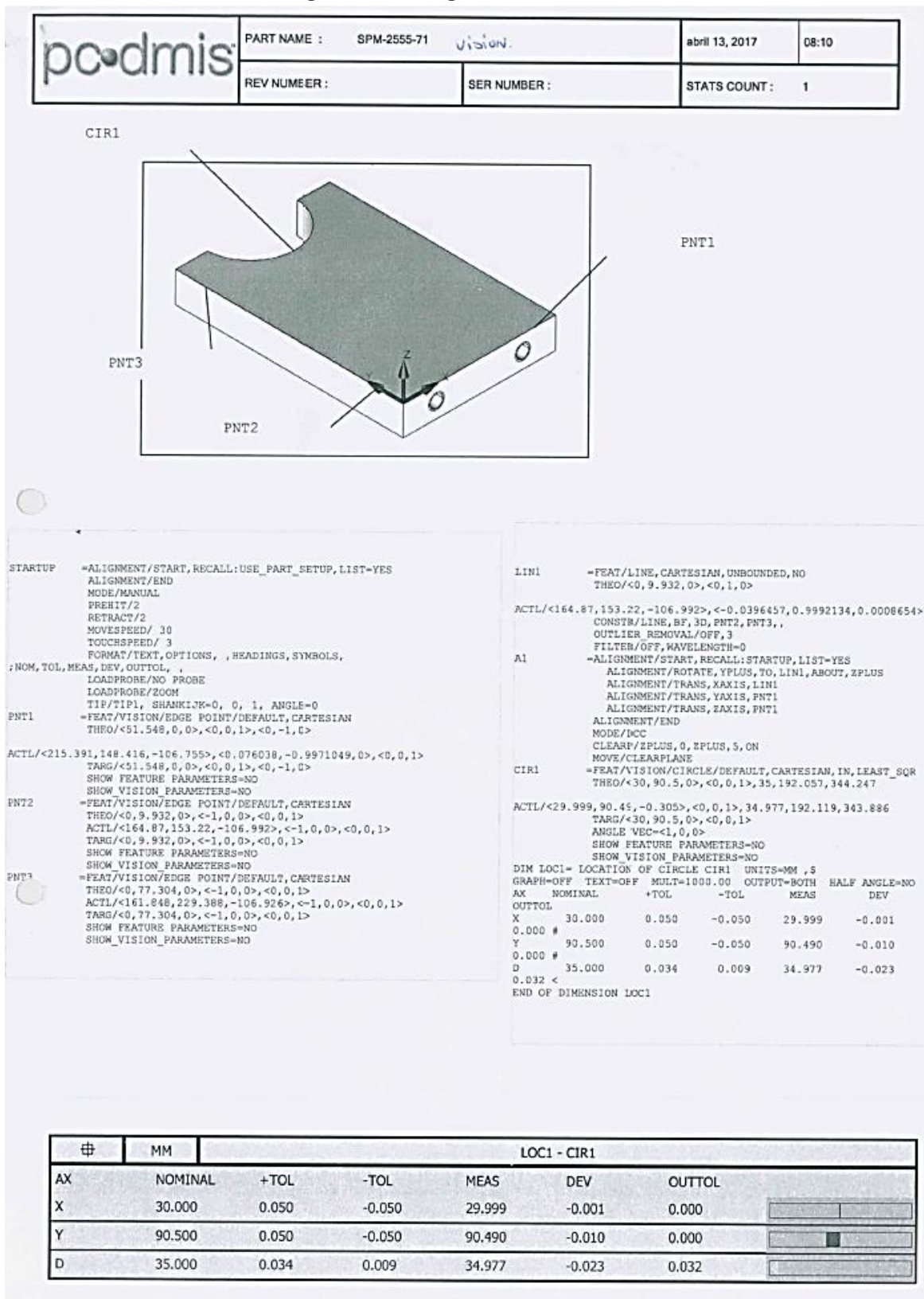


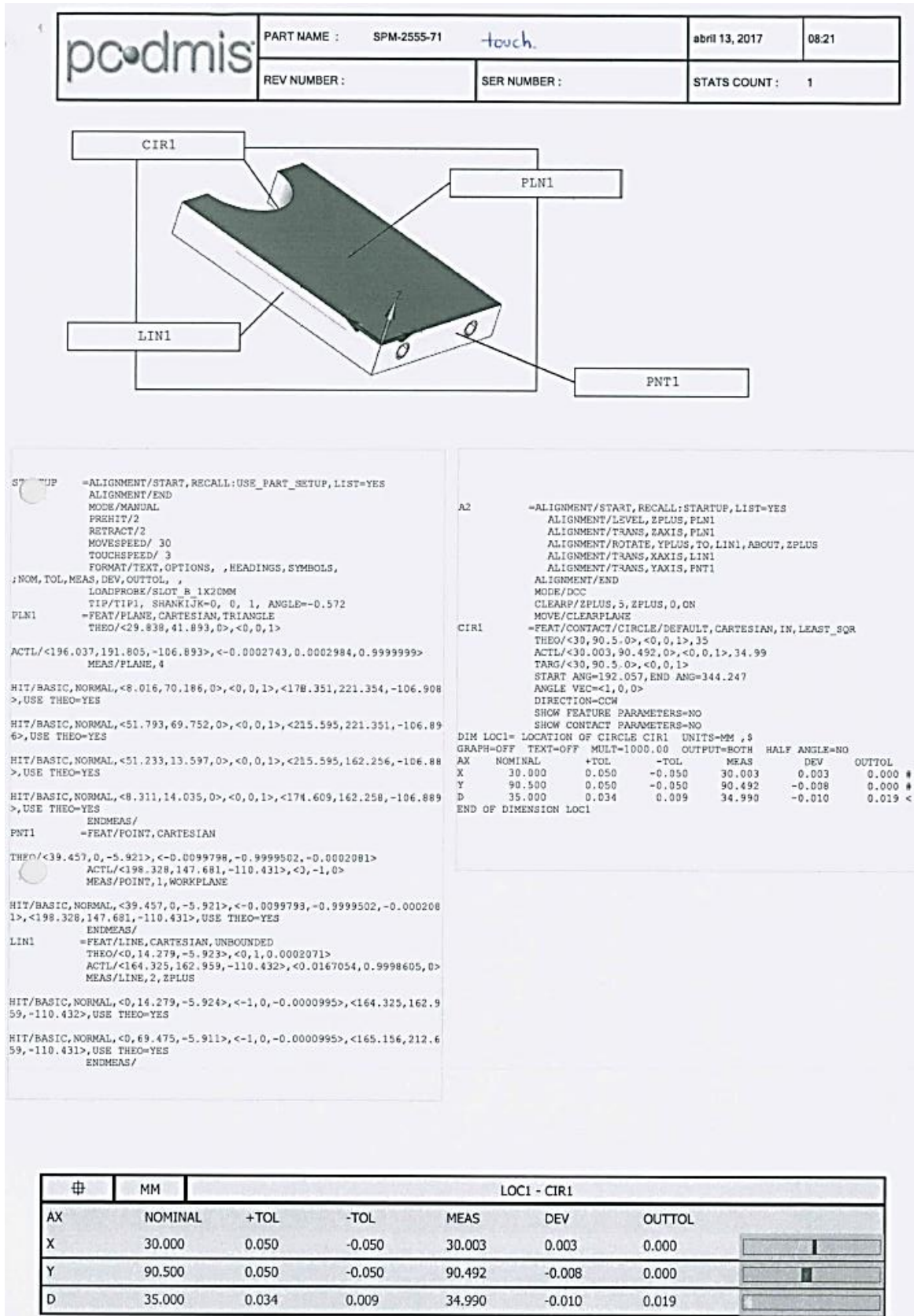
## VIII. Código ISO gerado – Caso de estudo 5

% O0001(DJY2000_G250_039_R000) (12-06-17 --- 12:58) (REF.-DJY2000_G250_039_R000) (GRAMPOS N- P/ FORA/DENTRO 0 MM ) (PEÇA P/ FORA DA BUCHA - MM APERTO - BAR ) (DIAMETRO DO MATERIAL )  (FERRAMENTAS A USAR) G21 G18 G0G28 V0 G0G28 U0 G0G28 W0 G0G28 B0 G40G80G13.1G99 (CANCELAMENTOS ) G54 (SISTEMA DE COORDENADAS DA PEÇA ) M34 (MODO DE TORNEAMENTO ) M108 (LIGA A LIMPEZA DO EIXO B )  (TOOL - 1 OFFSET - 1) (FERRO EXT DESBASTE RAI0 0.8 INSERT) G0 T0101 M8 G97 S2000 M03 P11 (ROTAÇÃO CONSTANTE) G0 X26.828 Z1.514 G50 S2000 (ROTAÇÃO MAX.) G96 S220 (ROTAÇÃO VARIÁVEL EM FUNÇÃO Ø) G99 G1 X24. Z.1 F.2 X-1.6 Z2.1 G0 Z4.1 X21.241 Z2.614 G1 X18.413 Z1.2 Z-43.4 X20. X22.828 Z-41.986 G0 Z2.614 X19.653 G1 X16.825 Z1.2 Z-43.4 X18.813 X21.641 Z-41.986 G0 Z2.614 X18.066 G1 X15.238 Z1.2 Z-43.4 X17.225 X20.053 Z-41.986 G0 Z2.614 X16.478 G1 X13.65 Z1.2 Z-43.4 X15.637 X18.466 Z-41.986 G0 Z2.614 X14.891 G1 X12.063 Z1.2 Z-43.4 X14.05 X16.878 Z-41.986 G0 Z2.614 X13.303 G1 X10.475 Z1.2 Z-43.4 X12.463 X15.291 Z-41.986 G0 Z2.614 X11.716 G1 X8.887 Z1.2 Z-43.4 X10.875 X13.703 Z-41.986 G0 Z2.614	X10.128 G1 X7.3 Z1.2 Z-.427 X7.773 Z-.664 G3 X8.3 Z-1.3 R.9 G1 Z-43.4 X9.287 X12.116 Z-41.986 M9 G28 V0 G28 U0 G28 W0 G28 B0 M111 M05 P11 T0100 M01 (TOOL - 2 OFFSET - 2) (FERRO EXT ACABAMENTO RAI0 0.4 INSERT) G0 T0202 M8 G97 S3000 M03 P11 G0 X10.978 Z1.414 G50 S3000 G96 S220 G1 X8.15 Z0. F.12 Z-43.425 X21. X23.828 Z-42.011 G0 Z1.414 X10.828 G1 X8. Z0. Z-43.5 X21. X23.828 Z-42.086 G0 Z.444 X11.301 G1 X8.473 Z-.971 X6.766 Z-.117 G2 X6.2 Z0. R.4 G1 X-1. X1.828 Z1.414 M9 G28 V0 G28 U0 G28 W0 G28 B0 M111 M05 P11 T0200 M01 (TOOL - 4 OFFSET - 4) (BROCA PONTEAR D12 "QBA") G0 T0404 M110 M8 G97 S1300 M03 P11 G0 X0. Z5. Z.5 G1 Z-2. F.01 G0 Z5. M9 G28 V0 G28 U0 G28 W0 G28 B0 M111 M05 P11 T0400 M01 (TOOL - 6 OFFSET - 6) (BROCA D 4 MM) G0 T0606 M110 M8 G97 S1300 M03 P11 G0 X0. Z5.	Z.5 G1 Z-.5 F.05 G0 Z.5 Z-.25 G1 Z-1.5 G0 Z.5 Z-1.25 G1 Z-2.5 G0 Z.5 Z-2.25 G1 Z-3.5 G0 Z.5 Z-3.25 G1 Z-4.5 G0 Z.5 Z-4.25 G1 Z-5.5 G0 Z.5 Z-5.25 G1 Z-6.5 G0 Z.5 Z-6.25 G1 Z-7.5 G0 Z.5 Z-7.25 G1 Z-8.5 G0 Z.5 Z-8.25 G1 Z-9.5 G0 Z.5 Z-9.25 G1 Z-10.5 G0 Z.5 Z-10.25 G1 Z-11.5 G0 Z.5 Z-11.25 G1 Z-12.5 G0 Z.5 Z-12.25 G1 Z-13.5 G0 Z.5 Z-13.25 G1 Z-13.65 G0 Z5. M9 G28 V0 G28 U0 G28 W0 G28 B0 M111 M05 P11 T0600 M01 (TOOL - 12 OFFSET - 12) (FERRO SANGRAR 3MM 15 GRAUS INSERT) G0 T1212 M8 G97 S357 M03 P11 G0 X80.286 Z-43.15 G50 S2000 G96 S90 X10.286 G1 X1.5 F.02 ( << linha mudada +F.02) G97 S500 X-.6 G0 X99.4 M9 G28 V0 G28 U0 G28 W0 G28 B0 M111 M05 P11 T1200 M30 %
--	--	--

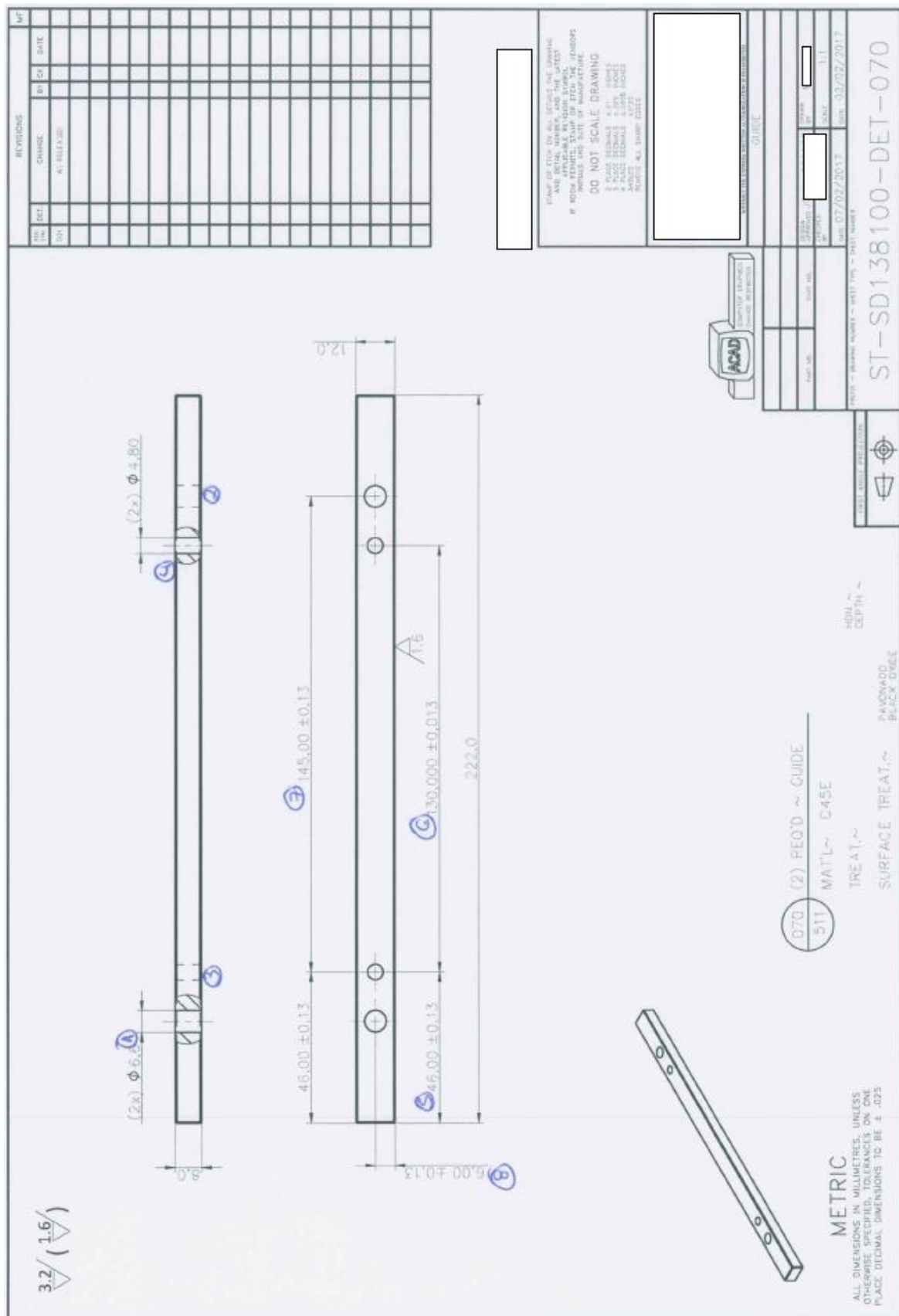
## IX. Outros Relatórios de trabalhos diversos realizados na fábrica

### 1. Medição de um semicírculo e geração de código CMM





## 2. Desenho e Relatórios da medição CMM de 5 peças





Production Part Approval Process Dimensional Results 0						
Supplier:		Part Number:				
<Supplier>		<Part Number>				
Inspection Facility:		Part Name:				
<Inspection Facility>		ST-SD138100-DET-070				
Sample Identification:		Revision:				
<Identification>						
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	6.600 (LOC1-D)	0.130	-0.130	6.535	✓	
2	6.600 (LOC2-D)	0.130	-0.130	6.562	✓	
3	4.800 (LOC3-D)	0.130	-0.130	4.925	✓	
4	4.800 (LOC4-D)	0.130	-0.130	4.929	✓	
5	46.000 (DIST1-M)	0.130	-0.130	45.997	✓	
6	130.000 (DIST2-M)	0.130	-0.130	130.018	✓	
7	145.000 (DIST3-M)	0.130	-0.130	145.025	✓	
8	6.000 (DIST4-M)	0.130	-0.130	5.951	✓	
9	130.000 (DIST6-M)	0.130	-0.130	130.018	✓	

Hexagon OPTIV classic.

Production Part Approval Process Dimensional Results 1						
Supplier:		Part Number:				
<Supplier>		<Part Number>				
Inspection Facility:		Part Name:				
<Inspection Facility>		ST-SD138 100-DET-070				
Sample Identification:		Revision:				
<Identification>						
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	6.600 (LOC1-D)	0.130	-0.130	6.543	✓	
2	6.600 (LOC2-D)	0.130	-0.130	6.579	✓	
3	4.800 (LOC3-D)	0.130	-0.130	4.920	✓	
4	4.800 (LOC4-D)	0.130	-0.130	4.925	✓	
5	46.000 (DIST1-M)	0.130	-0.130	46.018	✓	
6	130.000 (DIST2-M)	0.130	-0.130	129.997	✓	
7	145.000 (DIST3-M)	0.130	-0.130	144.973	✓	
8	6.000 (DIST4-M)	0.130	-0.130	6.027	✓	
9	130.000 (DIST6-M)	0.130	-0.130	129.997	✓	

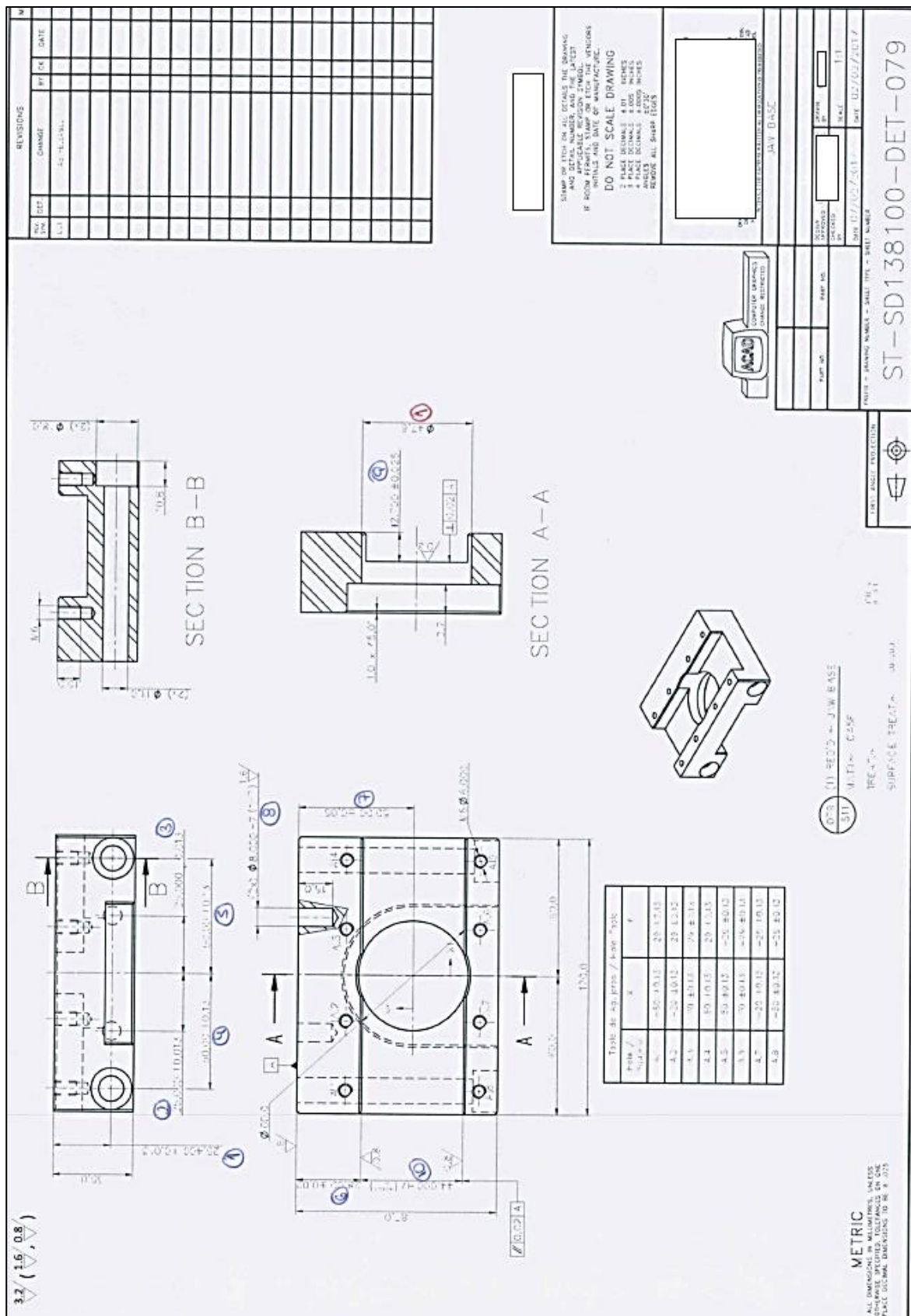
Production Part Approval Process Dimensional Results 2						
Supplier:			Part Number:			
<Supplier>			<Part Number>			
Inspection Facility:			Part Name:			
<Inspection Facility>			ST-SD138 100-DET-070			
Sample Identification:			Revision:			
<Identification>						
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	6.600 (LOC1-D)	0.130	-0.130	6.599	✓	
2	6.600 (LOC2-D)	0.130	-0.130	6.580	✓	
3	4.800 (LOC3-D)	0.130	-0.130	4.926	✓	
4	4.800 (LOC4-D)	0.130	-0.130	4.921	✓	
5	46.000 (DIST1-M)	0.130	-0.130	45.996	✓	
6	130.000 (DIST2-M)	0.130	-0.130	129.999	✓	
7	145.000 (DIST3-M)	0.130	-0.130	144.980	✓	
8	6.000 (DIST4-M)	0.130	-0.130	5.998	✓	
9	130.000 (DIST6-M)	0.130	-0.130	129.999	✓	

Production Part Approval Process Dimensional Results 3						
Supplier:			Part Number:			
<Supplier>			<Part Number>			
Inspection Facility:			Part Name:			
<Inspection Facility>			ST-SD138 100-DET-070			
Sample Identification:			Revision:			
<Identification>						
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	6.600 (LOC1-D)	0.130	-0.130	6.532	✓	
2	6.600 (LOC2-D)	0.130	-0.130	6.526	✓	
3	4.800 (LOC3-D)	0.130	-0.130	4.907	✓	
4	4.800 (LOC4-D)	0.130	-0.130	4.911	✓	
5	46.000 (DIST1-M)	0.130	-0.130	46.011	✓	
6	130.000 (DIST2-M)	0.130	-0.130	129.999	✓	
7	145.000 (DIST3-M)	0.130	-0.130	145.014	✓	
8	6.000 (DIST4-M)	0.130	-0.130	6.030	✓	
9	130.000 (DIST6-M)	0.130	-0.130	129.999	✓	

Production Part Approval Process Dimensional Results 4						
Supplier:		Part Number:				
<Supplier>		<Part Number>				
Inspection Facility:		Part Name:				
<Inspection Facility>		ST-SD138100-DET-070				
Sample Identification:		Revision:				
<Identification>						
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	6.600 (LOC1-D)	0.130	-0.130	6.535	✓	
2	6.600 (LOC2-D)	0.130	-0.130	6.562	✓	
3	4.800 (LOC3-D)	0.130	-0.130	4.925	✓	
4	4.800 (LOC4-D)	0.130	-0.130	4.929	✓	
5	46.000 (DIST1-M)	0.130	-0.130	45.997	✓	
6	130.000 (DIST2-M)	0.130	-0.130	130.018	✓	
7	145.000 (DIST3-M)	0.130	-0.130	145.025	✓	
8	6.000 (DIST4-M)	0.130	-0.130	5.951	✓	
9	130.000 (DIST6-M)	0.130	-0.130	130.018	✓	



### 3. Desenho e relatório de uma peça prismática



**Production Part Approval Process (PPAP) → Para aprovação de produção em série**

Supplier: <Supplier> Part Number: <Part Number>

Inspection Facility: <Inspection Facility> Part Name: ST-SD138 100-D-ET-079-001

Sample Identification: <Identification> Revision:

Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	10.00000 (LOC1-X)	0.13000	-0.13000	10.00463	✓	
2	66.00000 (LOC1-Y)	0.13000	-0.13000	66.01597	✓	
3	40.00000 (LOC2-X)	0.13000	-0.13000	40.01036	✓	
4	66.00000 (LOC2-Y)	0.13000	-0.13000	66.03986	✓	
5	80.00000 (LOC3-X)	0.13000	-0.13000	80.01134	✓	
6	66.00000 (LOC3-Y)	0.13000	-0.13000	66.00687	✓	
7	110.00000 (LOC4-X)	0.13000	-0.13000	109.99947	✓	
8	66.00000 (LOC4-Y)	0.13000	-0.13000	66.02475	✓	
9	110.00000 (LOC5-X)	0.13000	-0.13000	110.01552	✓	
10	8.00000 (LOC5-Y)	0.13000	-0.13000	8.03319	✓	
11	80.00000 (LOC6-X)	0.13000	-0.13000	80.02322	✓	
12	8.00000 (LOC6-Y)	0.13000	-0.13000	8.03282	✓	
13	40.00000 (LOC7-X)	0.13000	-0.13000	40.01277	✓	
14	8.00000 (LOC7-Y)	0.13000	-0.13000	8.05457	✓	
15	10.00000 (LOC8-X)	0.13000	-0.13000	10.02371	✓	
16	8.00000 (LOC8-Y)	0.13000	-0.13000	8.02442	✓	
17	60.00000 (LOC9-X)	0.13000	-0.13000	60.04368	✓	
18	37.00000 (LOC9-Y)	0.13000	-0.13000	37.01002	✓	
19	47.60000 (LOC9-D)	0.20000	-0.20000	47.44987	✓	

①

Production Part Approval Process Dimensional Results						
Supplier: <Supplier>			Part Number: <Part Number>			
Inspection Facility: <Inspection Facility>			Part Name: ST-SD 138 100-DET-079-001			
Sample Identification: <Identification>			Revision:			
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
20	60.00000 (LOC10-X)	0.13000	-0.13000	60.02166	✓	
21	37.00000 (LOC10-Y)	0.13000	-0.13000	37.01959	✓	
22	47.60000 (LOC10-D)	0.13000	-0.13000	47.53557	✓	
23	10.00000 (LOC11-X)	0.13000	-0.13000	10.06228	✓	
24	-25.40000 (LOC11-Z)	0.05000	-0.05000	-25.40128	✓	
25	11.00000 (LOC11-D)	0.20000	-0.20000	11.08234	✓	
26	35.00000 (LOC12-X)	0.13000	-0.13000	35.00624	✓	
27	-25.40000 (LOC12-Z)	0.05000	-0.05000	-25.41317	✓	
28	8.00000 (LOC12-D)	0.01500	0.00000	8.00679	✓	
29	85.00000 (LOC13-X)	0.13000	-0.13000	85.02300	✓	
30	-25.40000 (LOC13-Z)	0.05000	-0.05000	-25.41406	✓	
31	8.00000 (LOC13-D) 847	0.01500	0.00000	8.00844	✓	
32	110.00000 (LOC14-X)	0.13000	-0.13000	110.02213	✓	
33	-25.40000 (LOC14-Z)	0.05000	-0.05000	-25.38322	✓	
34	11.00000 (LOC14-D)	0.13000	-0.13000	11.04813	✓	
35	28.000 (DIST2-M)	0.020	-0.020	28.005	✓	
36	50.000 (DIST3-M)	0.050	-0.050	50.022	✓	
37	25.000 (DIST4-M)	0.013	-0.013	25.008	✓	
38	25.000 (DIST5-M)	0.013	-0.013	25.008	✓	
39	50.000 (DIST6-M)	0.130	-0.130	50.008	✓	
40	50.000 (DIST7-M)	0.130	-0.130	49.952	✓	
41	12.700 (DIST8-M)	0.025	-0.025	12.705	✓	
42	0.000 (DIST10-M)	0.013	-0.013	0.000	✓	
43	44.000 (DIST11-M)	0.025	0.000	44.006	✓	



Medição da Tabela de furos		Production Part Approval Process Dimensional Results				
Supplier: <Supplier>		Part Number: <Part Number>				
Inspection Facility: <Inspection Facility>		Part Name: ST-SD138100-DET-079-001				
Sample Identification: <Identification>		Revision:				
Item	Specification	+Tol	-Tol	Measurement	OK	Reject
1	-50.000 (LOC1-X)	0.130	-0.130	-50.039	✓	
2	29.000 (LOC1-Y)	0.130	-0.130	29.006	✓	
3	-20.000 (LOC2-X)	0.130	-0.130	-20.033	✓	
4	29.000 (LOC2-Y)	0.130	-0.130	29.030	✓	
5	20.000 (LOC3-X)	0.130	-0.130	19.968	✓	
6	29.000 (LOC3-Y)	0.130	-0.130	28.997	✓	
7	50.000 (LOC4-X)	0.130	-0.130	49.956	✓	
8	29.000 (LOC4-Y)	0.130	-0.130	29.015	✓	
9	50.000 (LOC5-X)	0.130	-0.130	49.972	✓	
10	-29.000 (LOC5-Y)	0.130	-0.130	-28.977	✓	
11	20.000 (LOC6-X)	0.130	-0.130	19.980	✓	
12	-29.000 (LOC6-Y)	0.130	-0.130	-28.977	✓	
13	-20.000 (LOC7-X)	0.130	-0.130	-20.031	✓	
14	-29.000 (LOC7-Y)	0.130	-0.130	-28.955	✓	
15	-50.000 (LOC8-X)	0.130	-0.130	-50.020	✓	
16	-29.000 (LOC8-Y)	0.130	-0.130	-28.986	✓	

Tabela de Agujeros / Hole Table		
Hole / Agujero	X	Y
A.1	-50 ±0.13	29 ±0.13
A.2	-20 ±0.13	29 ±0.13
A.3	20 ±0.13	29 ±0.13
A.4	50 ±0.13	29 ±0.13
A.5	50 ±0.13	-29 ±0.13
A.6	20 ±0.13	-29 ±0.13
A.7	-20 ±0.13	-29 ±0.13
A.8	-50 ±0.13	-29 ±0.13